

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2012

Bc. Robin Maralík

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Návrh řízené kompenzace rozvodny 6 kV
pro napájení válcovny kolejnic

Design of Controlled Compensation
in 6 kV Substation

2012

Bc. Robin Maralík

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Robin Maralík**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika

Téma: **Návrh řízené kompenzace rozvodny 6 kV pro napájení válcovny kolejnic .**
Design of Controlled Compensation in 6 kV Substation

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor koncepce napájení průmyslových rozvodů
2. Konfigurace sítě ET a.s. a válcovny předvalků a hrubých profilů v TŽ a.s.
3. Možnosti kompenzace rozvodny R2
4. Výběr optimální varianty kompenzace a její technické řešení
5. Technicko-ekonomické zhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení, Skripta VŠB-TU Ostrava, 1990
2. Hodinka, M.: Přenos a rozvod elektrické energie, SNTL, 1989
3. Trojánek, Z.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL 1987
4. Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL, 1991
5. Normy, firemní literatura, předpisy a směrnice TŽ Třinec, a.s.

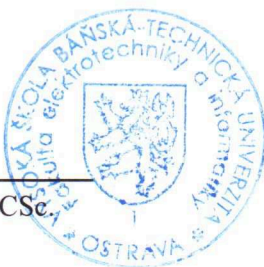
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

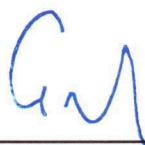
Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě, dne 4. 5. 2012



podpis studenta

Děkuji tímto vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Dr. Ing. Jiřímu Gureckému za jeho odbornou pomoc, věcné připomínky a výbornou spolupráci. Rovněž děkuji panu Ing. Tomáši Sniegoňovi za poskytnuté provozní informace.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem řízené kompenzace rozvodny 6 kV v areálu Třineckých železáren. První část práce popisuje teoretický rozbor koncepce napájení průmyslových rozvodů a možnosti kompenzace jalové energie rozvodny zásobující provoz válcovny předvalků a hrubých profilů. Praktická část je zaměřena na analýzu naměřených dat z provozu válcovny, včetně jejich vyhodnocení podle kompatibilních úrovní. Následně je proveden výběr optimální možnosti kompenzace. Samotný návrh je orientován na stupňovitě spínané kompenzační zařízení s dimenzováním přívodního kabelu, pojistek, vakuových stykačů, hradících tlumivek, kompenzačních kondenzátorů a regulace. Poslední kapitola obsahuje technické a ekonomické zhodnocení navržené kompenzace se zaměřením na investiční nároky projektovaného řešení.

Abstract

This diploma thesis deals with design of controlled compensation for substation 6 kV in area Třinecké železářny. In the first part of thesis there is the theoretical analysis of industrial power distribution systems and options power factor correction in substation of the rolling-mill semi-finished products and coarse profiles. The practical part is focused on the analysis of measured data of operation rolling-mill including their compared with compatibility levels and selection optimal option compensation. The design itself is directs on switching power factor correction system. There is dimensioned main cable and the basic elements of compensation devices, which are fuses, vacuum contactors, detuned reactors, capacitors and power factor regulator. The last chapter contains technical and economic evaluation of design compensation focused on investment demands of project solution.

Klíčová slova

Průmyslový rozvod, kompenzace jalové energie, chráněná kompenzace, jalový výkon, vakuové stykače, ochranné tlumivky, kompenzační kondenzátory.

Key Words

Industrial distribution, power factor correction, detuned power factor correction, reactive power, vacuum contactors, detuned reactors, compensation capacitors.

Seznam použitých symbolů a zkratek

C_{IY}	kapacita kondenzátoru trojfázové baterie zapojené do hvězdy	(μF)
C_{ID}	kapacita kondenzátoru trojfázové baterie zapojené do trojúhelníka	(μF)
HDO	hromadné dálkové ovládání	
I	efektivní hodnota proudu	(A)
I_C	skutečný proud kondenzátoru (efektivní hodnota)	(A)
I_{CN}	jmenovitý proud kondenzátoru (efektivní hodnota)	(A)
P_S	celkové ztráty kondenzátoru vlivem všech harmonických	(W)
P_Z	celkové ztráty kondenzátoru pro 1. harmonickou	(W)
ΔP_P	činné ztráty způsobené činnou složkou proudu	(W)
ΔP_Q	činné ztráty způsobené jalovou složkou proudu	(W)
Q_C	kompensační výkon kondenzátoru	(var)
Q_{CN}	jmenovitý kompenzační výkon kondenzátoru	(var)
R	rezistance obvodu	(Ω)
U	efektivní hodnota napětí	(V)
U_C	napětí kondenzátorové baterie po předřazení tlumivek (sdružená ef. hodnota)	(V)
U_{CN}	jmenovité napětí kondenzátorové baterie (sdružená efektivní hodnota)	(V)
U_f	efektivní hodnota fázového síťového napětí	(V)
U_h	efektivní hodnota napětí h-té harmonické v % U_N	(%)
U_N	efektivní hodnota sdruženého napětí sítě	(V)
$\cos\varphi$	účinník	(-)
f_h	kmitočet h-té harmonické	(Hz)
f_n	pracovní kmitočet	(Hz)
f_r	rezonanční kmitočet	(Hz)
h	řád harmonické	(-)
p	činitel zatlumení	(%)
$tg\delta$	ztrátový činitel kondenzátoru	(-)
α	řídící úhel	($^\circ$)
ρ	činitel nesymetrie napájecího napětí	(%)
ω	úhlová rychlost (pro 50 Hz: 100π)	($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)

OBSAH

ÚVOD	1
1 TEORETICKÝ ROZBOR KONCEPCE NAPÁJENÍ PRŮMYSLOVÝCH ROZVODŮ	2
1.1 Vstupní a podružné stanice průmyslového rozvodu.....	2
1.1.1 Transformovny.....	3
1.1.2 Rozvodná zařízení a jejich provedení	4
1.1.3 Odbočky rozvodných zařízení	8
1.2 Druhy průmyslového rozvodu.....	9
1.2.1 Dimenzování rozvodů.....	10
1.3 Požadavky na průmyslový rozvod	11
1.4 Zvláštnosti rozvodu elektrické energie v hutním závodě.....	11
1.5 Odběr elektrické energie.....	12
1.6 Kompenzace jalového výkonu	13
1.6.1 Technické prostředky pro kompenzaci jalového výkonu	14
1.6.2 Připojení kompenzátorů do sítě.....	16
2 KONFIGURACE ELEKTRICKÉ SÍTĚ TŘINECKÝCH ŽELEZÁREN, A.S.....	18
2.1 Válcovna předvalků a hrubých profilů	18
2.2 Napájení válcovny předvalků a hrubých profilů	19
3 MOŽNOSTI KOMPENZACE ROZVODNY R2	20
3.1 Prosté kondenzátory.....	20
3.2 Chráněné kompenzační sekce	21
3.3 Kompenzační filtry	23
3.4 Regulace kompenzačního výkonu	24
3.4.1 Stupňovitě spínané kompenzátory	25
3.4.2 Plynule řízené kompenzátory	27
4 ANALÝZA SÍTĚ VÁLCOVNY PŘEDVALKŮ A HRUBÝCH PROFILŮ	28
4.1 Teoretický rozbor sítě	28
4.2 Kompatibilní úrovně v průmyslových závodech	29
4.3 Analyzátor elektrických sítí QUALISTAR – C.A 8334	31
4.4 Výsledky měření	32

4.4.1	Odchylky síťového kmitočtu	32
4.4.2	Odchylky napětí	32
4.4.3	Nesymetrie napájecího napětí	33
4.4.4	Nesouměrnost zátěže	33
4.4.5	Průběh činného a jalového výkonu	34
4.4.6	Harmonické	37
4.4.7	Průběh účinníku	38
5	VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY A JEJÍ TECHNICKÉ ŘEŠENÍ	39
5.1	Připojení kompenzačního zařízení	40
5.2	Výkony kompenzačních stupňů bez tlumivek	40
5.2.1	Parametry regulátoru ovlivňující návrh kompenzace	41
5.2.2	Návrh nejmenšího kompenzačního stupně	42
5.2.3	Celkový počet stupňů a jejich váhy	43
5.3	Návrh ochranných tlumivek a sestavení kompenzačních stupňů	45
5.4	Zhodnocení návrhu kompenzačních stupňů	47
5.5	Přetížení kondenzátorů	48
5.6	Dimenzování přívodů, spínacích a jisticích přístrojů	49
5.6.1	Hlavní přívodní kabel rozvaděče	49
5.6.2	Spínání kompenzačních sekcí	50
5.7	Komponenty kompenzačního zařízení	54
5.7.1	Hrazený kompenzační rozvaděč VN	54
5.7.2	Hlavní vypínač a jištění rozvaděče	55
5.7.3	Jištění kompenzačních stupňů	55
5.7.4	Vakuové stykače	56
5.7.5	Výkonové kondenzátory	57
5.7.6	Ochranné hradící tlumivky	57
5.7.7	Rychlovybíjecí zařízení	58
5.7.8	Regulátor jalového výkonu	58
5.7.9	Ostatní ochranná opatření	58
6	TECHNICKO - EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	59
ZÁVĚR	60	
LITERATURA	61	
SEZNAM OBRÁZKŮ	62	
SEZNAM TABULEK	63	
SEZNAM PŘÍLOH	63	

Úvod

Kvalita elektrické energie je specifická tím, že není ovlivněna pouze kvalitou výroby, ale i kvalitou přenosu a spotřebou. Závisí na ni nejen spolehlivost, bezpečnost a efektivnost průmyslové výroby, ale také bezproblémový chod celé distribuční sítě. Proto jsou na její dodržování kladeny vysoké nároky stanovené normou. Hlavní ukazatele elektrické energie, nazýváme charakteristikami sítě. Tyto je potřeba udržovat v určité toleranci, překročením se odběratel vystavuje možným postihům od energetických závodů. Prostředky umožňující udržení elektrických parametrů v stanovených mezích označujeme jako kompenzační zařízení.

Význam slova kompenzace znamená vyrovnávání, nebo eliminování zpětných vlivů spotřebičů na napájecí síť. V průmyslových provozech se potýkáme především s odběrem elektrické energie s nízkým účínkem, produkcí harmonických nelineárními spotřebiči a nesymetrií. Zcela ideální řešení je odstranit příčiny zpětných vlivů přímo u problémových spotřebičů. Mnohdy odstranění jedné příčiny vede k potřebě řešit důsledky jiné. Vývoj techniky přinesl napěťové měniče pracující s účínkem blízkým jedné, avšak s vysokým deformačním výkonem. Eliminace deformačního výkonu je pak možná pouze nasazením aktivních filtrů s vysokými investičními náklady.

Z hlediska investic je v průmyslových rozvodech výhodnější eliminovat následky v podobě centrálních jednotek, nikoliv příčiny u jednotlivých spotřebičů. Vzhledem k uvažované soudobosti tak dochází k redukci výkonu kompenzačních zařízení. Základním kritériem pro realizaci kompenzace je, aby získané úspory byly větší, než náklady s kompenzací spojenou.

Diplomová práce přináší ucelený pohled na problematiku průmyslového rozvodu, zaměřenou na jeho koncepční uspořádání s navázáním na možnosti kompenzace zpětných vlivů spotřebičů na síť v rozvodně pro napájení válcovny předvalků a hrubých profilů v Třineckých železárnách.

Pro rozhodnutí o vhodném typu kompenzace je v dalších kapitolách proveden rozbor řešené sítě a analýza dat, poskytujících nezbytné údaje o odběrech v síti. Na základě zorientování se v problematice projektování daného typu kompenzačního zařízení je vytvořen technický návrh ekonomicky přijatelného řešení s upozorněním na úskalí, které alternativa přináší.

Závěrečná část diplomové práce má podobu ekonomického zhodnocení optimální varianty. Pro objektivní posouzení je vyčíslena investiční náročnost projektu a provedeno srovnání se současně provozovaným způsobem kompenzace. S ohledem na nabyté zkušenosti při návrhu dané kompenzace a konzultace s dodavateli kompenzačních zařízení je doporučen vhodný kandidát k realizaci navrhnutého rozvaděče.

1 Teoretický rozbor koncepce napájení průmyslových rozvodů

Elektrizační soustava (ES) je soubor vzájemně propojených zařízení, zprostředkovávajících přenos velkých výkonů na hladinách velmi vysokého napětí (400 kV, nebo 220 kV) z míst výroby k hlavním uzlům ES a následnou distribuci na nižších napěťových hladinách k jednotlivým spotřebitelům. Spojovacím prvkem mezi přenosovou a distribuční soustavou jsou transformační stanice, kde se přenosové napětí transformuje na 110 kV, část elektrické energie napájí velké průmyslové podniky, nebo měnírny pro trakční vedení drah, část se přivádí do blízkosti měst, kde se transformuje na hladinu vysokého napětí pro zásobování lehkého průmyslu, měst, obcí. Napájení budov pro bydlení, budov občanské výstavby, malých podniků zajišťuje rozvod nízkého napětí.

Připojení průmyslového závodu k ES je realizováno prostřednictvím elektrické stanice, zařízení, které umožňuje rozvětvení elektrické energie při stejném napětí (*spínací stanice*), nebo transformaci a následný rozvod (*transformační stanice*), popřípadě přeměnu druhu proudu, či kmitočtu a jeho další rozvádění (*měnírny*).

Průmyslový rozvod je obvykle tvořen:

- vstupní stanicí (transformovny, spínací stanice)
- napájecím rozvodem včetně podružných stanic (transformoven, rozvoden, nebo rozvaděčů)
- provozními rozvody
- rozvody a zařízeními pro řízení elektrického rozvodu

1.1 Vstupní a podružné stanice průmyslového rozvodu

Provozní rozvody velkých hutních závodů jsou zásobovány několika hlavními rozvodnami umístěnými v blízkosti provozů s největším odběrem společně s přidruženými trafostanicemi (110/22 kV, 110/22/6 kV). Tyto rozvodny jsou napájeny z jedné, častěji více vstupních stanic umístěných ve vhodném místě pro připojení. Konkrétní konfigurace rozvodných cest je závislá jak na velikosti, počtu, umístění napájecích zdrojů, tak na velikosti, počtu a uspořádání odběrných míst.

Základním prvkem elektrických stanic vstupních, i podružných jsou rozvodná zařízení. Jejich úkolem je rozvádět přivedenou elektrickou energii do několika větví. Rozvod do odbočujících větví (*odboček*) zprostředkovávají holé vodiče jdoucí celým rozvodným zařízením - tzv. *přípojnice*. Odbočky představují souhrn zařízení a přístrojů (spínacích, řídících, jistících, ovládacích) potřebných k bezpečnému provozu každého vývodu.

Vyžaduje-li sestavení přístrojů a zařízení zvláštní stavebně - konstrukční provedení, nazýváme tento soubor *rozvodna*. Zařízení se montují přímo na místě z jednotlivých funkčních jednotek (přípojnice, odpojovač, vypínač MTP, MTN, bleskojistka,...). Konstrukční celek rozvodného zařízení s vestavěnými přístroji, přípojnícemi a pomocnými obvody vyráběný v závodu nazýváme *rozvaděč*. Zařízení nn v provedení nástěnné desky, nebo skříňky označujeme jako *rozvodnice*.

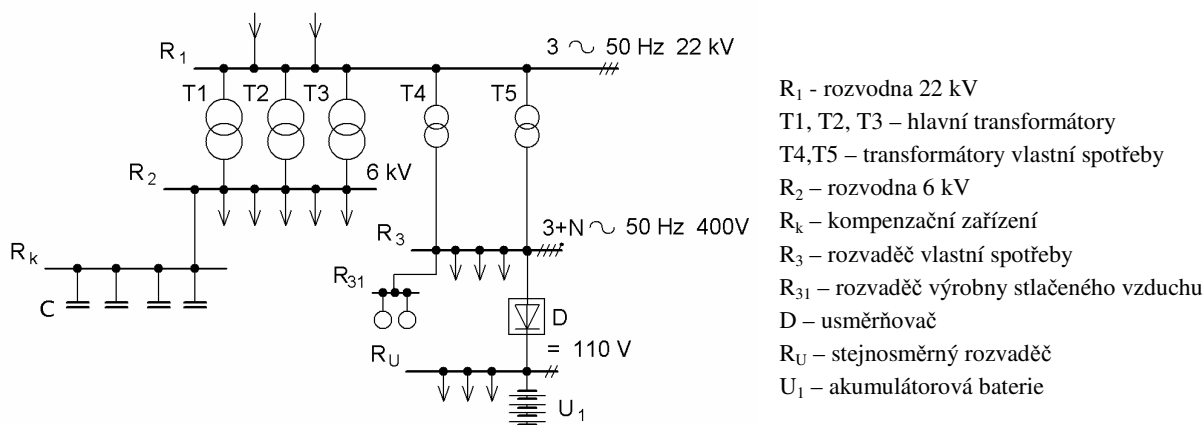
1.1.1 Transformovny

Transformovny zajišťují spolupráci rozvodných zařízení o různých napěťových hladinách, jak znázorňuje Obr. 1.1-1. Součástí je jedno nebo několik rozvodných zařízení, transformátorové stanoviště, zařízení pro vlastní spotřebu transformovny (transformátory a rozvaděče vlastní spotřeby, akumulátorové baterie), zařízení pro výrobu a rozvod stlačeného vzduchu k ovládání přístrojů vn (vvn), osvětlení, vytápění, větrání. Ve velkých stanicích bývá ovládání soustředěno do zvláštních prostorů, tzv. dozoren.

Podle umístění transformátorů rozlišujeme transformovny vnitřní, nebo venkovní. Uvnitř budovy mohou být s transformátorem i všechna rozvodná zařízení. Častá je i kombinace vnitřního provedení rozvodny s venkovním stanovištěm transformátoru. Venkovní stanoviště je uspořádáno tak, že transformátor stojí na betonovém základě na kolejnicích, pod ním je jímka pro zachycení oleje a prostor je pro ochranu ostatních zařízení před případným požárem ze tří stran obezděn. K zajištění chlazení je stanoviště transformátoru situováno na severní straně objektu.

Velikost a počet průmyslových transformátorů se řídí požadavkem bezpečného, hospodárního provozu a stupněm důležitosti dodávky el. energie. Pro zajištění prvního stupně důležitosti musí být k dispozici alespoň dva transformátory, přičemž výkon druhého z nich musí být takový, aby pokryl dodávku všech provozů prvního stupně. V provozech s těžkým rozběhem motorů je vhodné oddělit světelné spotřebiče od motorových tak, že pro každou skupinu je určen samostatný transformátor. Odstraní se tak negativní důsledky kolísání napětí u svítidel.

V silnoproudém rozvodu se nejčastěji používají transformátory trojfázové. Tři jednofázové jednotky se používají jen pro nejvyšší napětí. Olejové transformátory s napětím 400/110 kV se vyrábějí o výkonech 250, 330, 400 MVA. Transformátory 110 kV/vn se provozují o výkonech 10 - 63 MVA. Pro menší výkony (moderní jednotky až do 15 MVA) s převodem vn/vn, vn/nn se používají transformátory i v suchém provedení se silikonovou izolací a vzduchovým chlazením. Lze je umístit přímo v místě spotřeby. Tím je splněno ekonomické hledisko přivést energii co nejbližší místu spotřeby. [2]



Obr. 1.1-1 Transformovna vn/vn

1.1.2 Rozvodná zařízení a jejich provedení

V průmyslovém rozvodu se rozvodná zařízení realizují buď jako součást transformoven, nebo jako samostatné části rozvodu. Vyskytují se ve všech uvažovaných hladinách napětí v různých místech rozvodu. Funkční požadavky mohou být tedy odlišné. Jinak budou vybavena rozvodná zařízení, u nichž dochází k důležitým spínacím procesům ovlivňujících konfiguraci sítě a manipulaci při poruchových stavech, jinak se vybavují rozvodná zařízení sloužící k připojení spotřebičů. Rozvodny vn a vn musí být vybaveny pomocnými zařízeními k signalizaci, měření, jištění a ovládání rozvodu.

Rozhodující vliv na řešení rozvodných zařízení mají:

- přenášené výkony
- velikost zkratových proudů
- požadovaný stupeň zajištění dodávky el. energie

Zkratová odolnost rozvodných zařízení se vyjadřuje podle ČSN EN 60865-1 doporučenými hodnotami jmenovitých vypínacích proudů, které jsou shodné s hodnotami krátkodobého nadproudu po dobu 2 s (6,3; 8; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63 kA) a příslušnými hodnotami jmenovitého dynamického proudu, tedy zapínacího proudu (16; 20; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160 kA)

- ***Rozvodná zařízení vn***

Pro průmyslové účely se používají rozvodná zařízení o napětí 110 kV, zejména ve vstupních napájecích stanicích. Jedná-li se o hutní či chemický průmysl, pak se napětí 110 kV používá i pro rozvody uvnitř závodu. Obvykle jsou venkovního provedení. To sice zvyšuje náklady na přístrojové vybavení, avšak snižuje stavební náklady. Vnitřní provedení přichází v úvahu v místech s mimořádně velkým znečištěním, nebo pro začlenění do velkých průmyslových kombinátů či měst, často v zapouzdřeném provedení s hexafluoridem síry.

- ***Rozvodná zařízení vn***

Nejčastěji se využívá rozvodných zařízení s napětím 6 kV a 22 kV, méně často pak 3 kV, 10 kV, 35 kV. Uspořádání je převážně skříňové, umožňující začlenění do výrobních provozů a tím zajistit hospodárnost přenosu. Kobkové uspořádání je dnes odůvodnitelné především v případech, kdy je vyžadována velká zkratová odolnost. Každá skříň (kobka) obsahuje vybavení jedné odbočky. U skříňového rozvaděče se využívá vypínačů ve výsuvném provedení, které nahrazuje přítomnost přípojnícového a vývodové odpojovače.

- ***Rozvodná zařízení nn***

Budují se jako prefabrikované rozvaděče, které se na místě pouze sestaví a připojí. Jmenovité napětí odpovídá jmenovitému napětí rozvodného systému (110, 230, 400, 500, 660 V). Vyznačují se vysokou variabilitou provedení. Aby se zabránilo neekonomickému rozvodu el. energie, jsou rozvodné systémy často kompenzovány. [2],[4]

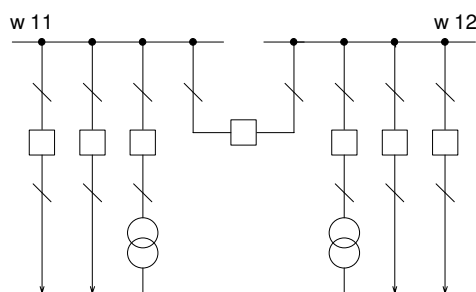
Nejdůležitější a zároveň nejchoulostivější součást rozvodných zařízení tvoří *přípojnicové systémy*. Porucha přípojnic znamená vyřazení z provozu všech odboček napojených na tyto přípojnice. Pro zvýšení spolehlivosti se u rozvodných zařízení využívají systémy jednoduché s podélným dělením, s pomocnou přípojnici, systémy dvou i tří hlavních přípojnic, které mohou být rovněž podélně rozděleny, nebo doplněny o systém pomocných přípojnic. Počet a uspořádání přípojnic jsou charakteristickým rysem rozvodny.

- **Jednoduchý systém přípojnic**

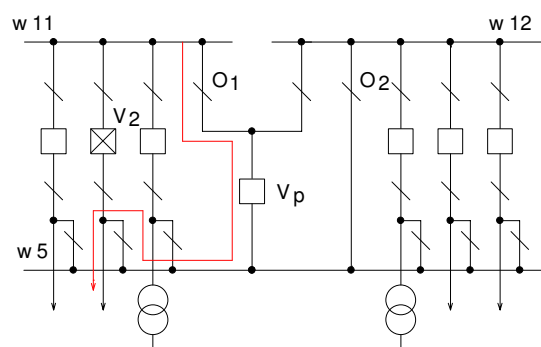
Nejjednodušší provedení rozvodného zařízení využívá tam, kde není požadavek nepřerušovaného zásobování při revizích a opravách. Tento systém je vhodný v případě, že do přípojnice pracuje jeden napáječ. Při větším počtu napáječů je vhodné systém rozdělit na dvě části (*Jednoduchý, podélně rozdělený systém přípojnic*) jak ukazuje Obr. 1.1-2. Tento systém umožňuje tři druhy provozu. Provoz s rozpojeným podélným spínačem přípojnic (nejčastěji), provoz s napájením všech odboček jedním zdrojem (vzájemný zások zdrojů) a provoz obou zdrojů při sepnutém spínači přípojnic (velké zkratové proudy). Systém se používá v rozvodných zařízeních vn do 10 kV.

- **Jednoduchý systém s pomocnou přípojnici**

Vedle systému hlavní přípojnice využívá ještě přípojnice pomocné (max. dvě). Jejím účelem je převedení výkonu vývodové odbočky, jejíž zařízení je odstavené z důvodu revize, nebo poruchy. Tento náhradní provoz je vyobrazen na Obr. 1.1-3. Na pomocnou přípojnici se připojuje pouze jedna odbočka. V_p představuje spínač *pomocné přípojnice* w5, odpojovače O_1 a O_2 umožňují podélné sepnutí hlavních přípojnic.



Obr. 1.1-2 Jednoduchý systém přípojnic



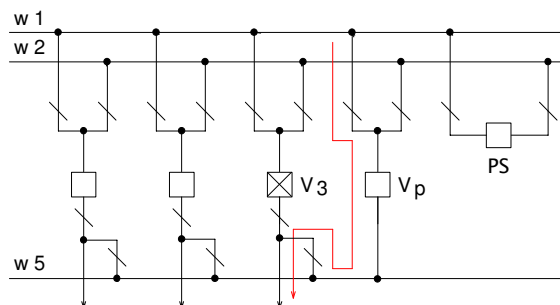
Obr. 1.1-3 Jednoduchý systém přípojnic s pp

- **Dvojitý systém přípojnic**

Používá se pro zajištění vysoké spolehlivosti dodávky el. energie, kde není přípustné ani krátkodobé přerušení. Dalším důvodem může být omezení zkratových proudů, potřeba oddělit spotřebiče kolísavého příkonu od spotřebičů citlivých na kolísání napětí, oddělení venkovních a kabelových sítí, nebo současné napájení ze dvou nespolupracujících zdrojů. Dvojitý systém přípojnic se rovněž může realizovat jako systém s podélným dělením přípojnic, nebo s pomocnou přípojnici.

- Dvojitý systém přípojníc s pomocnou přípojnící**

Všechny vývody jsou za vývodovým odpojovačem propojeny s pomocnou přípojnící w5 přes odpojovač. Tato konfigurace umožňuje převést energii z pomocné přípojnice do libovolného vývodu. Odbočka se spínačem pomocné přípojnice V_p nahradí odbočku odpojenou. PS představuje příčný spínač přípojníc.



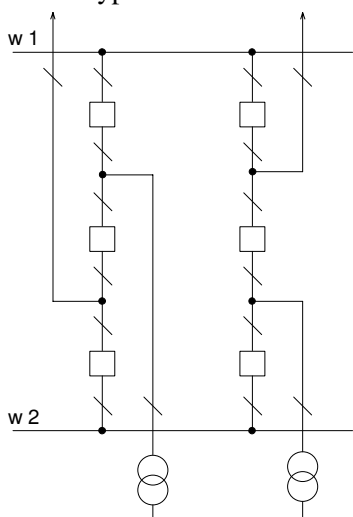
Obr. 1.1-4 Dvojitý systém přípojníc s pomocnou přípojnící

- Dvojitý systém přípojníc, z nichž jedna slouží jako pomocná**

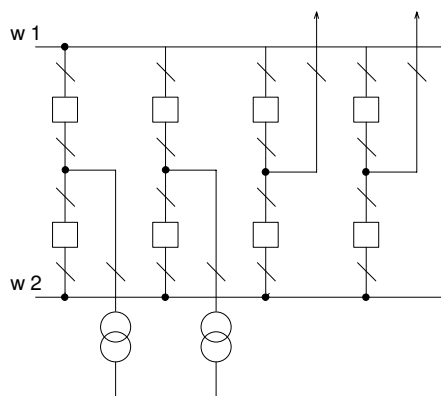
Systém umožňuje využít jednu hlavní přípojnici jako pomocnou. Schéma se podobá Obr. 1.1-4 s rozdílem, že všechny vývody mají za vývodovým odpojovačem provedeno přemostění vypínače na jednu hlavní přípojnici. Přemostění umožní náhradní napájení odbočky s vyřazeným vypínačem přes příčný spínač přípojníc. Nevýhodou je, že při provozu hlavní přípojnice jako pomocné, je potřeba převést ostatní odbočky na druhou hlavní přípojnici.

- Systém s větším počtem vypínačů na odbočku**

Jedná se o speciální případy pro zvýšení provozní spolehlivosti. Na Obr. 1.1-5 je systém s 1,5 vypínačem na odbočku. Nevýhodou jsou vyšší investiční náklady, neboť každá dvojice odboček je vybavena třemi vypínači. Na Obr. 1.1-6 je systém pro rozvodny se zvlášť náročným provozem.



Obr. 1.1-5 Systém s 1,5 vypínačem na odbočku



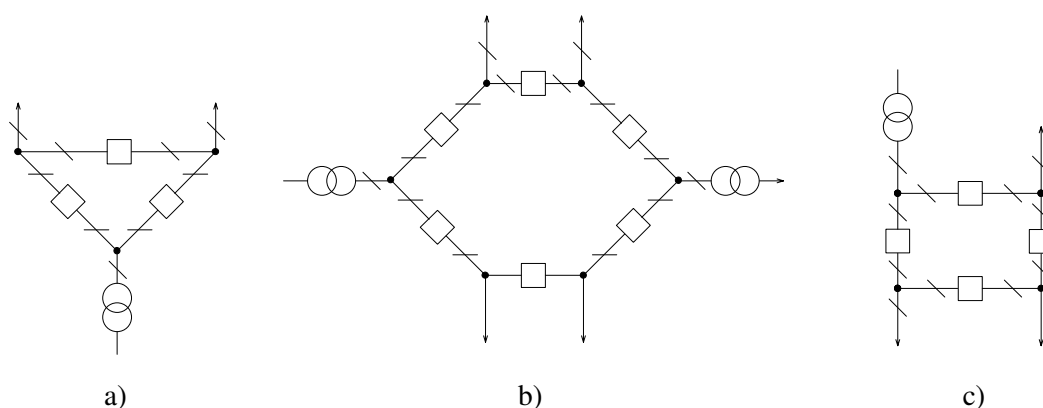
Obr. 1.1-6 Systém se 2 vypínači na odbočku

- **Trojítý systém přípojníc**

Je využíván v největších rozvodnách, kde je potřeba trvale provozovat odděleně dvojítý systém přípojníc a není přípustné ani krátkodobé přerušení dodávky el. energie, nebo tam, kde je nutno dělit provoz do více skupin z důvodu velkých zkratových výkonů. Pro vytvoření většího počtu oddělených úseků, lze přípojnice dělit podélně.

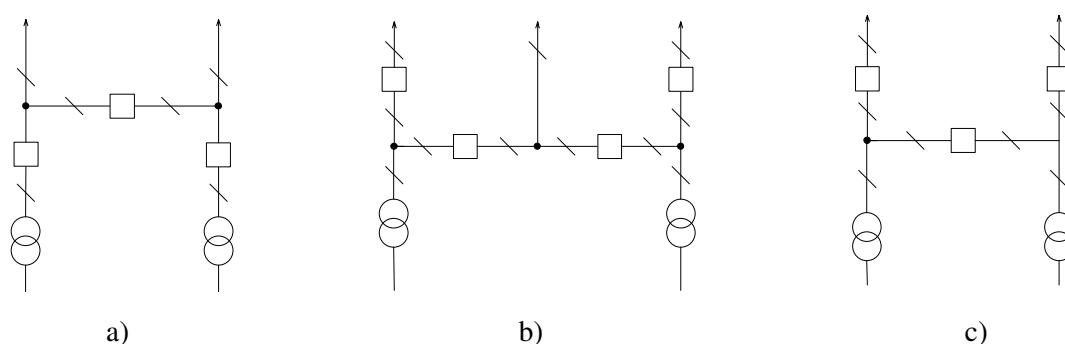
- **Rozvodná zařízení bez přípojníc**

Využívají se pro malý počet odboček, nejčastěji u rozvodů vvn. Místo přípojníc obsahují uzlové body pro tři větve rozbočení. Počet uzlových bodů i počet vypínačů odpovídá počtu odboček (každá odbočka je připojena mezi dva vypínače). Výhodou je jednoduchost, nízké náklady, vysoká spolehlivost. Příklady těchto tzv. okružních zapojení pro tři, čtyři a šest odboček jsou na Obr. 1.1-7.



Obr. 1.1-7 Okružní přípojnice

Ještě úspornější zapojení, kde je počet vypínačů menší, než počet odboček, označeno jako “H” je na Obr. 1.1-8. Tato zapojení vynikají jednoduchostí, spolehlivostí a využívá se jich pro rozvodny vvn s odpovídajícím počtem odboček, kde se nepředpokládá další rozšíření.



Obr. 1.1-8 Rozvodná zařízení typu “H”

Jedná se o schéma běžné pro malé distribuční stanice 110 kV / vn se dvěma přívody a dvěma transformátory. Zapojení a) umožňuje nepřerušovaný provoz v případě poruchy transformátoru. Využívá se u průběžných vedení. Pro vedení koncová se používá zapojení c). [3]

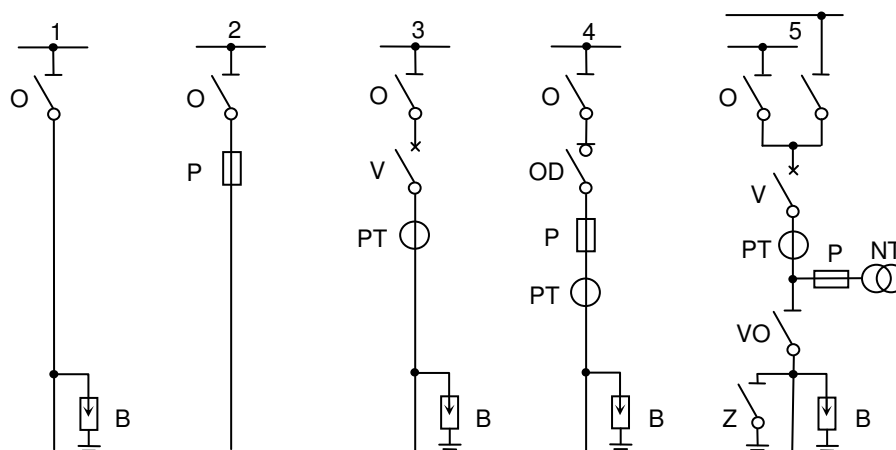
1.1.3 Odbočky rozvodných zařízení

Vybavení odboček u různých druhů rozvodů je principiálně podobné. Jednotlivé přístroje se liší především napěťovou hladinou, proudovou a zkratovou odolností.

- **Spínací přístroje** – slouží k zapínání a vypínání odbočky se zatížením, nebo bez zatížení (vypínač, odpínač, odpojovač, stykač, jistič)
- **Přípojnícové odpojovače** – zajišťují viditelné odpojení od zdroje napájení, tedy přípojníc
- **Vývodové odpojovače** – zajišťují viditelné odpojení vývodu od vlastní odbočky. Můžou být doplněny o zemnicí nůž, který spojí vodiče vývodu se zemí a odvede zbytkový náboj kabelu.
- **Přístrojové transformátory proudu a napětí** – transformují proud a napětí na standardní hodnoty vhodné pro napájení měřících, řídicích, ochranných a signalizačních přístrojů.
- **Měřící a ochranná zařízení** – měří výkon přenášený odbočkou, parametry el. energie, zajišťují činnost elektrických ochran v daném vývodu.

Podle funkce, rozlišujeme *hlavní odbočky*, přes které se energie přivádí do přípojníc (alternátorové, transformátorové) a ze kterých se odvádí výkon z přípojníc do jednotlivých větví (vývodové). Dále pak *vedlejší odbočky* určené k spínacím a měřícím úkonům, tzn. spínání hlavních a pomocných přípojníc, měření napětí, nebo připojení bleskojistik.

Na Obr. 1.1-9 je výzbroj některých odboček vn. *Odbočka č. 1* je přívodní (jištění se uvažuje na začátku vedení). *Odbočka č. 2* může sloužit jako napájecí, vývodová, ale i vedlejší. *Odbočka č. 3* s vypínačem nemá úplné vyzbrojení - je vhodná pro přenášení menších výkonů. *Odbočka č. 4* je vyzbrojena odpínačem a jištěna pojistkou proti zkratu. Je tedy schopna přenášet a odepínat výkony až do jmenovitého zatížení vývodu. Pro přenos největších výkonů slouží *odbočka č. 5* se dvěma systémy přípojníc, vybavena i měřením napětí a proudu vývodu. [4]



O – odpojovač, B – bleskojistka, P – pojistka vn, V – vypínač, OD – odpínač, PT – proudový transformátor, NT – napěťový transformátor, VO – vývodový odpojovač, Z – zemnicí nůž

Obr. 1.1-9 Schéma odboček vn

1.2 Druhy průmyslového rozvodu

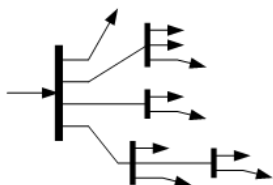
Podle počtu napáječů a podle způsobu napájení jednotlivých odběrných míst můžeme rozlišit následující druhy rozvodů:

- **Paprskový rozvod**

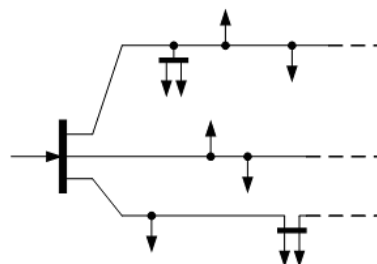
Paprskový rozvod na Obr. 1.2-1 je používán pro napájení provozů s nízkými nároky na spolehlivost, tzn. bez instalovaných spotřebičů prvního stupně důležitosti. Provedení je jednoduché s nízkými investičními náklady. Dle konfigurace rozvodu dochází při jakékoliv poruše na vedení k odpojení všech odběrů napájených postiženým paprskem.

- **Průběžný rozvod**

Dle Obr. 1.2-2 jde o variantu paprskového rozvodu se srovnatelně nízkou spolehlivostí. Vedení prochází průběžně od jednoho rozvaděče (spotřebiče) k druhému. Připojení je provedeno paprskovou, nebo smyčkovou odbočkou. Využití nachází při napájení menších odběrů a pro osvětlení průmyslových hal.



Obr. 1.2-1 Paprskový rozvod



Obr. 1.2-2 Průběžný rozvod

- **Okružní rozvod**

Je tvořen uzavřenou smyčkou, ze které se napájí odbočky k spotřebičům, nebo podružným rozvaděčům (Obr. 1.2-3). Tento rozvod umožňuje při poruše na okruhu napájet spotřebiče a rozvaděče z druhé strany jako dva paprsky. Tím je zajištěna vyšší spolehlivost dodávky el. energie.

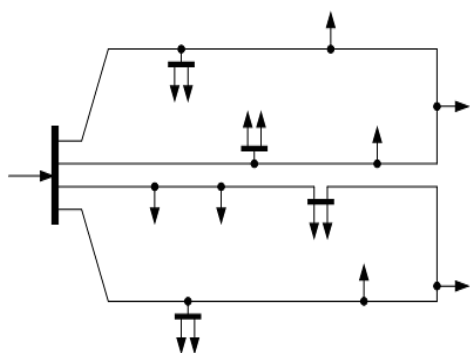
- **Hřebenový rozvod**

Topologie připomíná okružní obvod. Rovněž vlastnosti a využití jsou podobné. Jednotlivé paprsky jsou spojeny v místě největší spotřeby, přičemž podél paprsku mohou být další odbočky pro ostatní spotřebiče.

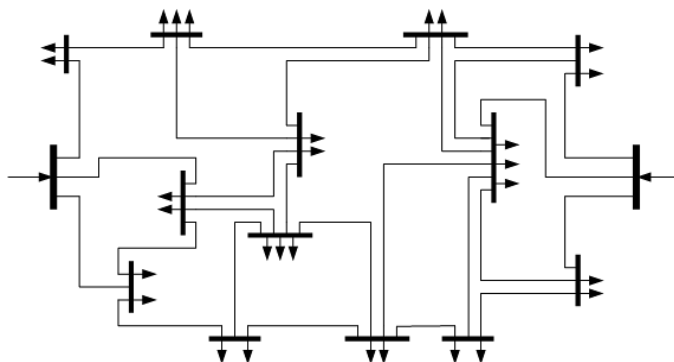
- **Mřížový rozvod**

Vznikne vzájemným propojením podružných rozvaděčů a napájením alespoň ze dvou míst. Tím je zabezpečena dodávka el. energie pro každý rozvaděč. Poruchy se omezí na krátké úseky při zachování provozuschopnosti sítě. Mřížový rozvod (Obr. 1.2-4) se vyznačuje vysokou variabilitou

provozních cest a provozní spolehlivosti na úkor vysokých investičních nákladů. Pro průmyslové účely lze použít u nepřetržitých provozů s dodávkou el. energie prvního stupně důležitosti.



Obr. 1.2-3 Okružní rozvod



Obr. 1.2-4 Mřížový rozvod

- ***Dvojpaprskový rozvod***

Konfiguraci tvoří dva paprskové rozvody s možností vzájemného záskoku dvou napáječů. Pro zabránění paralelního chodu transformátorů při provozu dvou napáječů, jsou všechny podružné rozvaděče podélně rozděleny (při výpadku zdroje, dojde k propojení). Dvojpaprskový rozvod je vhodný pro zajištění dodávky prvního stupně v průmyslových závodech s důležitými odběry, nebo ve vlastní spotřebě elektráren. [16]

1.2.1 Dimenzování rozvodů

Dimenzování vedení pro průmyslový rozvod se téměř neliší od návrhu vedení pro jiné účely (proudové zatížení, úbytek napětí, mechanická pevnost, tepelné a dynamické účinky zkratového proudu, bezpečnost provozu). Větší pozornost je potřeba věnovat hospodárnosti průřezu z důvodu zatěžování dlouhodobého charakteru s dobou plných ztrát významně větší než 1000 h/rok. Zcela odlišné je však uložení vedení. Nejčastější ukládání je na lávkách, vícevrstvých rostech, na povrchu stěn, nebo v kabelových kanálech. Možné je i uložení kabelů do pískového lože v zemi. V tomto případě je nutné zajistit potřebnou hloubku uložení odvíjející se od provozního napětí a místa uložení.

Pro menší závody se používají kabelové kanály přístupné shora, zakryté ocelovým plechem. Ve velkých podnicích se mohou využít i kanály průlezné, nebo průchozí. U kanálů musí být zajištěno odtékání vody. U průchozích a průlezných typů navíc i větrání a osvětlení ovládané u každého vstupu. Přesné požadavky pro ukládání vedení specifikuje ČSN 33 2000-5-52.

Jako vodiče se používají vícežilové izolované vodiče, nebo kabely. Silový rozvod se většinou provádí jako paprskový, popřípadě okružní. Z důvodu zajištění selektivity ochrany bývají smyčky provozovány rozpojeně. Ve větších průmyslových halách se používá i přípojnícový rozvod, tedy rozvod holými vodiči pod stropem pracovní haly, nejméně však ve výšce 5 m nad podlahou. Z těchto vodičů se provádějí odbočky kabely po stěnách, sloupech, nebo i svislé odbočky vzduchem k nejbližším pracovním strojům. Pokud hrozí náhodný dotyk živých částí je potřeba zajistit krytí. [4]

1.3 Požadavky na průmyslový rozvod

Základním požadavkem na průmyslový systém je umožnit přenos elektrické energie o dostatečném výkonu a kvalitě od zdrojů (přípojka, vlastní elektrárna) k jednotlivým provozům.

Řešení rozvodných systémů je přizpůsobeno zvyklostem a požadavkům daného průmyslového odvětví. Každé řešení průmyslového rozvodu by mělo být hodnoceno podle toho, do jaké míry odpovídá následujícím požadavkům:

- bezpečnost osob a vlastního zařízení
- odolnost vůči prostředí
- automatické odepnutí vadných částí
- vyloučení rušivých vlivů na vlastní i okolní zařízení
- možnost rozšíření
- přizpůsobivost při změnách dispozic
- přehlednost
- využití opakovatelných prvků
- investiční náklady
- ztráty a ostatní provozní náklady
- možnost rychlého odstranění poruch
- provozní spolehlivost

Splnění požadavků ovlivňuje velikost zkratových výkonů i úbytky napětí v rozvodném systému. Při velkých zkratových výkonech je potřeba zařízení rozvodu značně předimenzovat, pro zajištění bezpečnosti, čímž se celý rozvod prodražuje. Vhodné je rozdělení systému na části, tak aby se zkratové proudy zmenšily. Napětí na svorkách spotřebičů nesmí poklesnout pod hodnoty stanovené normou. Kolísání napětí se zvláště nepříznivě projevuje u svítidel. Proto se světelné obvody napájejí přes samostatný rozvaděč ze samostatného transformátoru. [2]

1.4 Zvláštnosti rozvodu elektrické energie v hutním závodě

V hutním průmyslu se setkáváme s provozem (spotřebiči) všech tří stupňů důležitosti. Tomu musí odpovídat i provedení silnoprůdného rozvodu. Hlavní provoz hutí, koksovna, ocelárna, vysoké pece jsou zásobovány samostatnými rozvody a vyžadují zajištění dodávky alespoň ze dvou nezávislých zdrojů. Nezávislémi zdroji mohou být např. vlastní elektrárna a síť vvn.

Rozvodny hlavních provozů bývají napájeny dvojpaprskovým provedením. Nejrozšířenějším rozvodem vn je izolovaná soustava 6 kV. V případě rozsáhlé kabelové sítě se soustava kompenzuje zhášecí tlumivkou, nebo se využívá zemnění činným odporem. Z hladiny 6 kV se napájejí motory s výkonem > 150 kW a transformátory s převodem 6 kV/nn. Vnitrozávodní síť vn pro napájení vzdálenějších provozů mohou mít i napětí 22 kV, popřípadě 110 kV při napájení elektrooceláren.

Obvyklá hranice zkratového výkonu pro rozvody 6 kV je 400 MVA, pro 22 kV – 600 MVA. Zkratový výkon je snižován postupnou transformací 110/22 kV, 22/6 kV. Vlivem zvýšené reaktance přívodů je dosaženo úspory investičních nákladů na přístrojové vybavení.

Hutní závody mívají i vlastní zdroje el. energie. Nejčastěji samostatné generátory – turbogenerátor s odběrovou parní turbínou zajišťující dodávku tepla např. pro vytápění objektů. V období odlehčeného provozu je možné dodávat přebytečnou energii vyrobenou synchronními generátory zpátky do sítě přes rozvod 110 kV. Jako záložních zdrojů se využívá dielelektrických soustrojí, eventuálně akumulátorových baterií.

Koncové transformátory se umísťují zásadně v centru spotřeby. Vhodné je využívat metodu předsunutého transformátoru.

Nízkonapěťové sítě jsou rozděleny zvlášť na okruhy pro napájení světelných spotřebičů 230 V s uzemněným uzlem a zvlášť na okruhy pro napájení motorů 3 x 500 V (izolovaná soustava). [5]

1.5 Odběr elektrické energie

Uskutečňuje se na jedné, nebo více hladinách za napájecím transformátorem. Energetické podniky vyžadují kompenzaci jalového výkonu na požadovanou úroveň, v místě připojení závodu na veřejnou rozvodnou soustavu, za účelem *odlehčení sítě*. Pracuje-li závod se zařízeními, která jsou zdrojem vyšších harmonických složek proudu, je odběratel povinen zajistit jejich eliminaci připojením filtračních obvodů. Používají se LC obvody naladěné na kmitočet určité složky, kterou eliminují.

Odběratel (závod) má s dodavatelem smluvně sjednané množství odebrané energie. Směrodatné jsou hodnoty *sjednaného odběru a čtvrt hodinového maxima*.

- ***Sjednaný odběr*** - je jmenovitý zdánlivý výkon napájecího transformátoru, nebo součet jmenovitých zdánlivých výkonů transformátorů v případě většího počtu napájecích jednotek.
- ***Čtvrt hodinové maximum*** – někdy označováno jako technické maximum závodu je hodnota sjednaného největšího zatížení, trvajícího nejméně patnáct minut, které se nesmí v provozu překročit. Za případné překročení může být odběratel penalizován.

Součástí smlouvy je i ***plán snižování spotřeby*** v případě nedostatku pohotového výkonu v soustavě. Podle tohoto plánu se na pokyn dispečera odepínají po určitých stupních méně významné spotřebiče tvořící požadovanou procentní hodnotu snížení odebírané energie.

Technické minimum závodu definuje nejmenší možný odebíraný výkon, při kterém je ještě možné závod provozovat, aniž by byl ohrožen technologický proces výroby. Hodnota je stanovena pro případ havarijní situace v elektrizační soustavě, kdy nerovnováha mezi požadovaným množstvím elektrické energie a množstvím vyráběné energie vede k poklesu kmitočtu.

U velkých průmyslových podniků je dozorem nad odběrem elektrické energie a správnou funkcí kompenzačních zařízení pověřen samostatný pracovník – *energetik závodu*. Jeho náplní je také sjednávat tarify, smlouvy o odběru el. energie a komunikovat s dispečerem rozvodné soustavy. [4]

1.6 Kompenzace jalového výkonu

Většinu elektrické energie v průmyslovém závodě odebírají motorické spotřebiče (asynchronní motory). Jejich provoz vyžaduje jalovou induktivní složku proudu, která se opožďuje za napětím o $\pi/2$, nekoná činnou práci a zbytečně zatěžuje rozvody a distribuční síť. Proto je výhodné tuto složku minimalizovat, neboli kompenzovat.

Odběr jalové složky je závislý na účinníku motoru $\cos\varphi$, který se mění se zatížením. Snahou je, aby motory pracovaly v oblasti jmenovitého výkonu, protože s poklesem zatížení, klesá i účinník. Nejnepríznivěji působí chod naprázdno, kdy účinník nabývá velmi malých hodnot ($0,3 \div 0,2$). Na účinník má vliv rovněž konstrukce motoru. Lepší účinník mívá elektromotor s kotvou nakrátko, oproti kotvě kroužkové. Příznivější účinník mívají motory rychloběžné a motory s nižším napětím. Značně špatným účinníkem s hodnotou okolo 0,2 se vyznačují svařovací transformátory a vysokofrekvenční indukční pece.

Důsledky špatného účinníku:

- navýšení ztrát v rozvodu elektrické energie
- větší úbytky napětí v rozvodu elektrické energie a větší kolísání napětí
- menší využití stávajících rozvodných zařízení pro přenos činného výkonu
- nárůst pořizovacích nákladů všech zařízení, dimenzovaných podle velikosti zdánlivého výkonu (zdroje, transformátory, přístroje spínací, ochranné a měřicí)
- zhoršení spolupráce mezi elektrárnami při předávání velkých jalových výkonů, zhoršení stability přenosu, snížení účinnosti alternátorů, transformátorů a dalších rozvodných zařízení
- zhoršení zkratových poměrů způsobené zvýšeným buzením generátorů (větší nárazový zkratový proud a ss složka, následně větší namáhání vypínačů)

Kromě těchto důvodů jsou všechny odběry kategorie A a B osazeny elektroměry spotřeby nebo dodávky jalové energie a při nedodržení předepsaných úrovní ($\cos\varphi = 0,95 \div 1$ ind.) platí odběratel přirážky k platbám za el. energii stanovené energetickým regulačním úřadem.

Pro poměr ztrát způsobených jalovou a činnou složkou proudu můžeme odvodit vztah:

$$\frac{\Delta P_Q}{\Delta P_P} = \frac{3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \sin^2 \varphi}{3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \cos^2 \varphi} = \operatorname{tg}^2 \varphi \quad (1.1)$$

Na základě rovnice 1.1 můžeme jednoduše ověřit, že při účinníku $\cos\varphi = 0,95$ budou ztráty způsobené jalovou složkou proudu přibližně 10x menší, než ztráty způsobené složkou činnou, zatímco již při účinníku $\cos\varphi = 0,5$ převažují ztráty jalovou složkou proudu a to trojnásobně. [5]

1.6.1 Technické prostředky pro kompenzaci jalového výkonu

Vykompenzování jalové složky proudu v průmyslu je nejčastěji realizováno *statickými kompenzátory*. Možné je i využití *rotačních kompenzačních zařízení*, tedy synchronních kompenzátorů, popřípadě synchronních motorů instalovaných v příslušné části rozvodu. Současnou eliminaci energetického rušení a kompenzaci jalového výkonu v provozech s dynamickými odběry poskytují *aktivní filtry*.

- ***Rotační kompenzační zařízení***

Synchronní kompenzátory fungují na principu synchronních motorů běžících naprázdno. Jsou tedy určené výhradně ke kompenzaci jalového výkonu. Oproti synchronním motorům jsou dimenzovány na menší zatížení, ale mají silnější buzení pro velký rozsah regulace jalového výkonu.

Měníme-li u synchronního stroje velikost budícího proudu při stálém napájecím napětí o stálém kmitočtu, pak za předpokladu neměnného zátěžného momentu je stálý i činný výkon motoru. Dochází však ke změně účinnku odběru motoru a to jak v oblasti induktivní, tak v oblasti kapacitní. Tím je umožněna kompenzace paralelně připojených spotřebičů. Závislost proudu statoru na budícím proudu při stálém výkonu má tvar V-křivek.

Z důvodu setrvačnosti stroje je kompenzační výkon i při rychlých budících soupravách dodáván s časovým zpožděním. To se při dynamických provozech projevuje častým překompenzováním, či nedokompenzováním. Další nevýhodou je odběr činné energie, odpovídající 2 - 8 % jmenovitého výkonu a oproti statickým kondenzátorům i vyšší náklady na investici a údržbu.

S ohledem na velké jednotkové výkony strojů, které se pohybují od 1 do 15 Mvar, se synchronních kompenzátorů používá jako centrální kompenzace velkých průmyslových sítí. Připojují se buď k přípojnícím podružným rozvodům, nebo přes samostatný transformátor 22/6 kV k přípojnícím hlavní rozvodny. [6]

- ***Statické kompenzátory***

V průmyslových závodech jsou nejvyužívanější variantou kompenzace jalového výkonu. Pod názvem statické kompenzátory rozumíme pasivní kompenzační prvky: prosté kondenzátory, kondenzátory hrazené tlumivkou – chráněné kompenzační sekce, sérioparalelní zapojení LC - kompenzační filtry.

Předností statických kompenzátorů jsou malé ztráty, poměrně přijatelné investiční náklady a téměř bezúdržbový provoz. Při správném návrhu mají vysokou spolehlivost a dlouhou životnost. K nevýhodám patří vznik *přechodných jevů* při spínání kondenzátorů. Připínáním kondenzátoru k již připojené baterii (u stupňovitě řízené kompenzace) překračuje amplituda přechodného děje i stonásobek jmenovitého proudu s kmitočtem větším než 10 kHz. Dalším negativním dopadem je *impulzní rušení* šířící se napájecí sítí a ovlivňující elektronická zařízení. Částečným řešením je zvýšení přírodní impedance připínaného obvodu (tlumivky, přechodné odporové spínání).

Kondenzátor zůstává po odpojení od sítě nabitý. Statický náboj je potřeba odvést, proto se kondenzátory vybavují vybíjecím zařízením v podobě odporů nebo tlumivek. Je-li kondenzátor trvale připojený na svorky elektrického stroje, není vybíjecí zařízení potřeba.

Úpravou vztahu pro vybíjení kondenzátoru můžeme vyjádřit hodnotu vybíjecího odporu jako:

$$R_v = \frac{t}{C \cdot \ln \frac{U_z}{U_d}} \quad (\Omega; s, F, V) \quad (1.2)$$

,kde U_d dovolené dotykové napětí

U_z zbytkové napětí na kondenzátoru

t doba bezpečného vybíjení kondenzátoru až do dosažení dotykového napětí

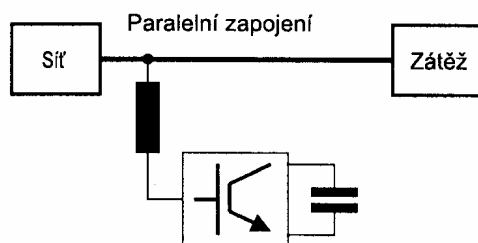
R_v vybíjecí odpor

Ckapacita kondenzátoru

- **Paralelní aktivní filtry**

Jako zdroj jalového výkonu využívají řízený polovodičový měnič, který je paralelně připojen k síti. Měnič je sestaven z moderních polovodičových součástek typu IGBT (tranzistory) nebo IGCT (tyristory).

Princip řízení jalového výkonu spočívá ve změně amplitudy napětí generované měničem. Je-li toto napětí nižší, než napětí sítě, vznikne na reaktanci X_R úbytek napětí v protifázi s napětím kompenzátoru a ze sítě je jalový výkon odebírán. Je-li napětí generované měničem větší, než napětí sítě, je jalový výkon do sítě dodáván.



Obr. 1.6-1 Připojení paralelního aktivního filtru k síti

Proces lze přirovnat k řízení jalového proudu změnou buzení synchronního generátoru, kdy přebuzením (zvýšením indukovaného napětí) je odebírán kapacitní proud a podbuzením proud induktivní. Proto je toto zařízení na trhu známé pod zkratkou STATCOM (static synchronous compensator).

Generováním zbytkové křivky proudu, tj. rozdílu mezi ideální sinusovou křivkou proudu a křivkou proudu, který odebírá kompenzovaný spotřebič je umožněno v každém okamžiku redukovat výskyt harmonických složek bez nebezpečí vzniku rezonance. Paralelní filtry upravují vlastnosti sítě směrem od zátěže ke zdroji (vyrovnávají rušivé účinky zátěže). [5], [6]

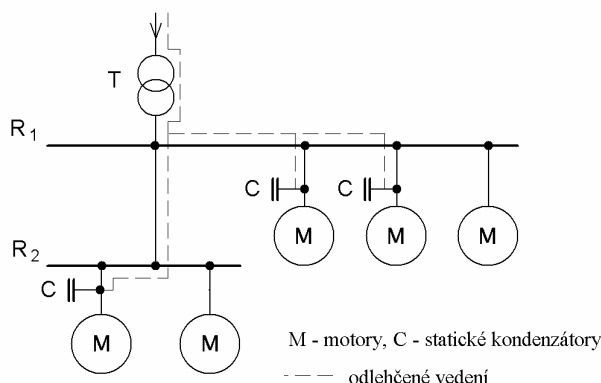
1.6.2 Připojení kompenzátorů do sítě

Z hlediska připojení kompenzačního zařízení je možné kompenzovat každý spotřebič zvlášť - *individuální* kompenzací, nebo několik spotřebičů dohromady - *skupinovou* kompenzací, či *centrální* kompenzací, je-li v jednom místě kompenzován např. celý závod. Výhodné je využívat kombinovaný způsob, tzn. největší spotřebiče kompenzovat individuálně a jalový výkon ostatních spotřebičů hradit z centrálně řízené jednotky.

- **Individuální kompenzace**

Kompenzovaný spotřebič má na svých svorkách připojeno kompenzační zařízení přesně navržené na jmenovitý výkon spotřebiče. Vybití kondenzátorů, po odpojení spotřebiče (motoru) od sítě, se děje přes jeho vinutí. Používá se u motorů velkých výkonů s dlouhou, nebo trvalou dobou provozu. (asynchronní motory s výkony desítek až stovek kilowatt), u transformátorů při chodu naprázdno, ale i u zářivkového osvětlení.

Výhodou je odlehčení celé elektrizační soustavy od zdroje až po spotřebič. Nevýhodou je velké množství kompenzačních zařízení při realizaci v průmyslu, tím i vysoké pořizovací náklady a malá investiční návratnost u spotřebičů nepracujících v trvalém, nebo dlouhodobém chodu.

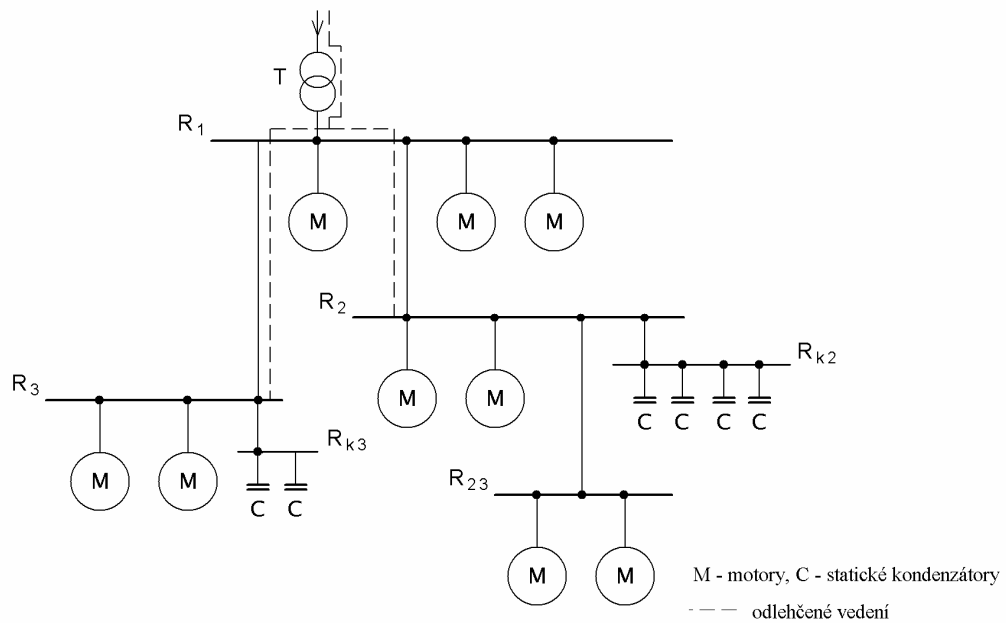


Obr. 1.6-2 Individuální kompenzace účinnosti

- **Skupinová kompenzace**

Kompenzátor je připojen na přípojnících rozvaděče (rozvodny) skupiny spotřebičů. Jednotlivé skupiny mohou tvořit oddělení, či dílny závodu. Dle druhu provozu musí mít vyhovující regulaci a výkon odpovídající výpočtovému zatížení.

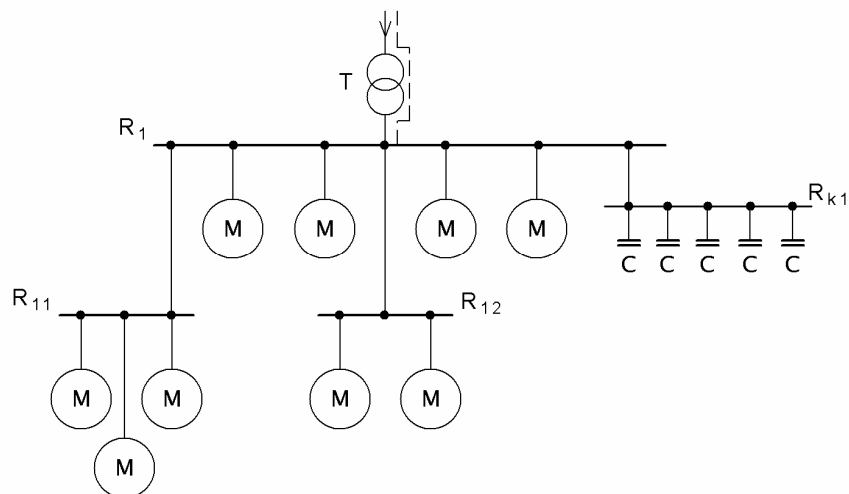
V případě použití skupinové kompenzace je odlehčen úsek vedení od kompenzovaného rozvaděče (rozvodny) ke zdroji (viz. Obr. 1.6-3). Velikost kapacitního výkonu je vzhledem k soudobosti spotřebičů menší než u individuální kompenzace (lepší využití kondenzátorové baterie). Výhodou jsou nižší investiční náklady, jednoduchá instalace a údržba. Nevýhodou je již zmíněná nutnost regulace kondenzátorové baterie a potřeba vybíjecích odporů pro zmaření naakumulované energie kondenzátorů po odpojení od sítě.



Obr. 1.6-3 Skupinová kompenzace účinníku

- **Centrální kompenzace**

Kompensátor s automatickou regulací se připojuje na přípojnice vstupní trafostanice, nebo v místě největší spotřeby. Potřebný kompenzační výkon klesá, vzhledem k soudobosti chodu spotřebičů, využití baterie je největší. Umístění centrální kompenzace je znázorněno na Obr. 1.6-4. Rozvod uvnitř závodu není odlehčen od přenosu induktivního výkonu.



Obr. 1.6-4 Centrální kompenzace účinníku

- **Kombinovaná kompenzace**

Jedná se o kombinaci předchozích typů používaných zejména v rozlehlých průmyslových závodech, nebo v odůvodnitelných případech (velké zátěže je vhodné kompenzovat individuálně). [2]

2 Konfigurace elektrické sítě Třineckých železáren, a.s.

Třinecké železářny patří k největším podnikům na severní Moravě. Pro zajištění spolehlivé dodávky el. energie je komplex zásobován ze tří navzájem nezávislých zdrojů. Prvním zdrojem je rozvodna Ropice, napájena dvěma vedeními z Lískovce a dvěma z Albrechtic. Druhý zdroj energie je přiveden dvěma linkami z Polské rozvodny Mnisztwo. Třetí nezávislý zdroj tvoří generátory Energetiky Třinec, a.s.

Celý komplex je rozdělen na severní a jižní oblast. Provoz severní části zajišťují venkovní rozvodny TII a TIII, obě zásobované vedeními 110 kV z rozvodny v Ropicích. V rozvodně TII je napětí transformováno na hladinu 22 kV pomocí transformátorů T111 a T112. Na straně 22 kV je provozován systém s podélným dělením, do něhož přispívají i dva generátory TG11 - 12 MW a TG12 - 33,6 MW. Na rozvodnu TIII jsou připojeny transformátory T104 a T105 pro transformaci na hladinu 6,3 kV.

Pro zásobování jižní oblasti slouží rozvodna TIV napojena dvěma linkami o napětí 110 kV na Ropice a dvěma linkami na polskou rozvodnu Mnisztwo. Strana 110 kV je v zapouzdřeném provedení s plynem SF₆, přípojnice tvoří podélně dělený systém. Transformaci na napětí podružných rozveden zajišťují čtyři trojvinutové transformátory T107 (110/22/6,3 kV), T108, T109, T110 (110/6,3/6,3 kV), každý o výkonu 40 MVA. Navíc je TIV propojena kabelem přes dvouvinutový transformátor T106 (110/22 kV) s rozvodnou TII. Současně do přípojníc rozvodny TIV pracuje generátor TG 14 - 16,8 MW. K napájení oblasti Jih přispívají i generátory TG1-25 MW a TG3-15 MW v rozvodně EII.

Rozvody jsou převážně kabelové uložené v zemi, nebo na kabelových lávkách. Provozuje se paprskový rozvod s možností propojit jednotlivé rozvodny v případě poruchy. [10], [11]

2.1 Válcovna předvalků a hrubých profilů

Válcovna předvalků a hrubých profilů (VH) se technologicky člení na krokovou pec, blokovnu + vratnou trať a střední trať. Provoz VH je nepřetržitý, třísměnný. Hlavním výrobním sortimentem blokovny jsou ocelové předvalky (kvádry 160 ÷ 280 mm) pro navazující vratnou trať. Vstupní vsázku tvoří kontislitky 300 x 350 mm ohřáté v krokové peci, případně v hlubinných pecích. Ohřátá vsázka je dopravníkem zavedena do válců a válcována na požadovaný rozměr. Předvalky určené pro další zpracování jsou přes mezivalník odsunuty na vratnou trať, finální výrobky (bloky, brámy) jsou nastříhány a přepraveny na brámové hospodářství.

Vratnou trať tvoří čtyři duostolice s průměrem válců 880 – 900 mm a délkou válců 1900 – 2200 mm. Vyrábí se zde kolejnice v délce až 78 m, profily U a I, příslušenství pro železniční svršek a sochory. První stolice slouží k válcování sochorů (kvádr 80 – 150 mm), které jsou vesměs zpracovány na dalších hotovných tratích válcovny drátů a jemných profilů. K dělení slouží sochorové “Demag” nůžky. Ostatní stolice jsou určeny k výrobě profilů. Trať je rovněž vybavena zařízením pro rovnání

kolejnic a profilů, zařízení pro kontrolu povrchových a vnitřních vad, laserovým zařízením pro měření přímosti, rozměrů kolejnic a apretační linkou.

Výrobním programem střední tratě je plochá ocel šířky 60 – 150 mm, tloušťky 5 – 50 mm, čtvercová ocel 35 x 35 ÷ 65 x 65 mm, kruhová ocel (tyče) průměru 33 – 90 mm, dále pružinová ocel pro parabolická péra, pružinové pásy se žebrem i drážkou, důlní kolejnice, příslušenství pro železniční svršek a speciální profily. Sochory připravené vratnou tratí délky 2,8 – 3,2 m ohřívané v narážecí peci střední tratě jsou válcovány ve dvou válcovacích pořadích. Po válcování jsou vývalky za tepla děleny na pile a odsunuty na chladicí lože. Poté se vyvácovaný materiál dělí na požadovanou délku. [12]

2.2 Napájení válcovny předvalků a hrubých profilů

Dodávku pro výrobu VH zajišťují rozvodny R2 a RAB připojené na vysokonapěťovou síť Energetiky Třinec a.s, která je výhradním distributorem el. energie.

Dvousystémová rozvodna RAB 6 kV slouží jako zdroj elektrické energie pro severní část rozvodu VH, tedy spojitě tratě a tři válcovací tratě. Navíc zásobuje slévárnu a stripovací haly ocelárny II. Rozvodna je rozdělena do tří sekcí, kde každou napájí jeden transformátor 22/6 kV o výkonu 16 MVA napojený na rozvodnu TII.

Rozvodna R2 napájí jižní část VH a je dimenzována tak, aby byla schopna napájet jak vratnou trať, tak i blokovnu. Jedná se o rozvodnu vybudovanou počátkem 80 let jako zdroj pro tyristorové měniče pohonů blokovny. Rozvodnu tvoří celkem 32 kobek uspořádaných naproti sobě ve dvou řadách po 16 kobkách. Dispozičně tvoří dva systémy přípojníc s možným rozdělením na 4 samostatné sekce prostřednictvím podélné spojky. Součástí rozvodny jsou i dva příčné spínače přípojníc. Samotná R2 se nachází v horním patře třípodlažní budovy. V druhém patře je situována podružná skříňová rozvodna R3.1 a R3.2. V dolní části se nachází velín.

Elektrická energie je do rozvodny R2 přivedena z nadřazených rozvodů TIV a EII. Z rozvodny TIV jsou přivedeny celkem tři přívody. Každý přívod tvoří 7 paralelních kabelů 6-AYKY 3 x 240 mm² délky 800 m. Rozvodna EII zásobuje R2 dvěma přívody, z nichž každý tvoří 4 kabely 6-AYKY 3 x 240 mm² délky 280 m.

Pro současné účely je rozvodna značně předdimenzována. Využito je celkem 18 kobek, tzn. 5 kobek přívodních, 7 kobek vývodových, po 2 kobkách pro měření, příčné spínače a kompenzaci. Ostatní kobky tvoří rezervy. Pro přívody a vývody se používá přípojnice W1. Přípojnice W2 slouží k připojení neřízených kompenzačních stanic koncipovaných jako filtry 5, 7, 11, 13 harmonické o výkonech $K1 = 7,9 \text{ Mvar}$ a $K4 = 8,28 \text{ Mvar}$. Kompenzace K1, nebo K4 jsou na požadavek Energetiky Třinec připojeny k síti trvale.

Kobky jsou vybaveny přípojnicovými odpojovači, PTP a PTN, ochranami, máloolejovými vypínači, vývodovými odpojovači. Přívody mají navíc omezovače přepětí. Přístrojové vybavení rozvodny je dimenzováno na jmenovitý krátkodobý zkratový proud 45 kA. [10], [11]

3 Možnosti kompenzace rozvodny R2

V současném provozu je k síti připojena trvale kompenzační stanice 7,9 Mvar nebo 8,28 Mvar na požadavek Energetiky Třinec. Na základě této dohody nejsou účtovány žádné přírážky za nedodržení účinní, avšak ztracená energie v těchto zařízeních je hrazena odběratelem. Důvodem realizace nové kompenzace je úspora ztrát, jelikož pro samotný provoz rozvodny R2 postačuje podstatně nižší kompenzační výkon.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.6.1 *Technické prostředky pro kompenzaci jalového výkonu*, nabízí se pro potřebu regulovatelné kompenzace technické možnosti v podobě rotačních kompenzátorů, řízených polovodičových měničů, nebo statických kondenzátorů.

Rotační kompenzátoři jsou v současné době v útlumu. Pomalá regulace, spotřeba činné energie, vyšší investiční a provozní náklady (viz. kap. 1.6.1) ve srovnání se statickou kompenzací vyřazují tuto možnost z oblasti realizovatelných řešení. Realizace kompenzačního zařízení v podobě aktivních filtrů je technicky nejdokonalejší variantou. Kromě kompenzace jalového výkonu umožňuje filtrovat harmonické, snížit flickr, symetrizovat zátěž, stabilizovat napětí. Avšak cena tohoto zařízení několikanásobně převyšuje cenu statické kompenzace.

Nejrozšířenějšími, ekonomicky přijatelnými kompenzačními prostředky pro hladinu vysokého napětí jsou v současné době statické kompenzátoři. Nabízí se několik variant závislých především na charakteru sítě a požadavku regulace.

3.1 Prosté kondenzátory

Kompenzace výkonovými kondenzátory bez chránění (bez předřazených tlumivek) je možné použít v sítích nízkého i vysokého napětí s nízkou úrovní energetického rušení. Tzn. tam, kde podíl instalovaného výkonu nelineárních spotřebičů nepřesahuje 10 až 15 % výkonu napájecího transformátoru. Měrné ztráty jsou max. 0,5 W/kvar. Kondenzátory musí být při vysokém jalovém výkonu tepelně stabilní, musí odolávat přepětí, samozřejmostí je i požadavek vysoké spolehlivosti.

Výkon kondenzátoru připojeného na napětí je dán vztahem:

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot C \quad (\text{var; kV, rad} \cdot \text{s}^{-1}, \mu\text{F}) \quad (3.1)$$

Pro trojfázový kondenzátor zapojený do hvězdy platí:

$$Q_C = 3U_f^2 \cdot \omega \cdot C_{1Y} \quad (\text{var; kV, rad} \cdot \text{s}^{-1}, \mu\text{F}) \quad (3.2)$$

Pro trojfázový kondenzátor zapojený do trojúhelníka platí:

$$Q_C = 3 \cdot U_N^2 \cdot \omega \cdot C_{1D} \quad (\text{var; kV, rad} \cdot \text{s}^{-1}, \mu\text{F}) \quad (3.3)$$

Podmínkou platnosti vztahů je symetrické zapojení (stejně hodnoty kondenzátorů).

Ztráty v kondenzátoru (ztráty dielektrika, vnitřních pojistek, vybíjecích odporů, spojů) ovlivňují kvalitu kondenzátorů a jsou reprezentovány tangentou ztrátového úhlu $\tan \delta$, tedy poměrem mezi sériovým odporem a kapacitní reaktancí kondenzátoru při sinusovém napětí a daném kmitočtu.

Celkové ztráty jsou dány vztahem:

$$P_Z = Q_C \cdot \tan \delta \quad (\text{W; var, -}) \quad (3.4)$$

Pro neharmonické průběhy je potřeba uvažovat vliv harmonických složek:

$$P_S = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot Q_n \cdot \tan \delta_n = 2 \cdot \pi \cdot C \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot U_n^2 \cdot f_n \cdot \tan \delta \quad (\text{W; } \mu\text{F, kV, Hz, -}) \quad (3.5)$$

Zvýšená provozní teplota zrychluje elektrochemickou degradaci dielektrika a ovlivňuje tak životnost kondenzátoru. Pokud není reálné zajistit dostatečné chlazení, pak je potřeba použít kondenzátory speciální, popřípadě s vyšším jmenovitým napětím.

Významnou vlastností kondenzátorů je frekvenční závislost impedance:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (\Omega; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}) \quad (3.6)$$

Připojí-li se kondenzátor do sítě s vysokým obsahem harmonických, bude pro ně představovat nízkou reaktanci. Nastane přetěžování kondenzátoru samotného i části sítě mezi zdrojem rušení a kondenzátorem. Zároveň hrozí rezonance s indukčností sítě a tedy ohrožení kondenzátorů i paralelně připojených spotřebičů. V těchto sítích je nutné použít *chráněné kompenzační sekce*. [6], [18]

3.2 Chráněné kompenzační sekce

Jsou tvořeny sériovou kombinací indukčnosti (hrazené tlumivky) a kondenzátoru. Tím je umožněno ladění obvodu na rezonanční kmitočet, na kterém se nevyskytují harmonické. Pro frekvence nižší než je rezonanční frekvence f_r se obvod bude chovat jako kondenzátor, pro $f > f_r$ bude obvod vykazovat induktivní charakter. Hrazené (ochranné) tlumivky rovněž omezují proudové rázy při spínání. Měrné ztráty jsou vyšší, než v předchozím případě (cca. 5,5 až 7 W/kvar, podle činitele zatlumení).

Charakteristickým parametrem při volbě kompenzačního členu je tzv. činitel zatlumení p :

$$p = \frac{1}{n_r^2} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3.7)$$

,kde n_r je poměr mezi kmitočtem, při kterém obvod vykazuje rezonanci (f_r) a kmitočtem pracovním (f_n):

$$n_r = \frac{f_r}{f_n} \quad (-; \text{Hz}) \quad (3.8)$$

Potřebná reaktance tlumivky je dána vztahem:

$$X_L = p \cdot X_C \quad (\Omega; -, \Omega) \quad (3.9)$$

Reaktance kompenzačního členu (kondenzátor + tlumivka):

$$X_{LC} = (1 - p) \cdot X_C \quad (\Omega; -, \Omega) \quad (3.10)$$

Připojíme-li ke kondenzátoru tlumivku, pak jeho napětí U_C bude větší než napětí síťové U_N :

$$U_C = \frac{U_N}{1 - p} \quad (\text{V}; \text{V}, -) \quad (3.11)$$

Reaktanci kondenzátoru snadno určíme ze jmenovitého napětí U_{CN} (hodnota udávaná výrobcem) a odpovídajícího kompenzačního výkonu Q_{CN} :

$$X_C = \frac{U_{CN}^2}{Q_{CN}} \quad (\Omega; \text{V}, \text{var}) \quad (3.12)$$

Při provozu na nižším napětí, popřípadě jiném kmitočtu je nutno přepočítat výkon kompenzačního kondenzátoru:

$$Q_2 = Q_1 \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \cdot \frac{f_2}{f_1} \quad (\text{var}; \text{var}, \text{V}, \text{Hz}) \quad (3.13)$$

Pro skutečný kompenzační výkon s tlumivkou platí vztah:

$$Q_{LC} = \frac{U_N^2}{X_{LC}} = \frac{U_N^2}{X_C \cdot \left(1 - \frac{p}{100} \right)} = \left(\frac{U_N}{U_{CN}} \right)^2 \cdot \frac{Q_{CN}}{1 - \frac{p}{100}} \quad (\text{var}; \text{V}, \text{var}, \%) \quad (3.14)$$

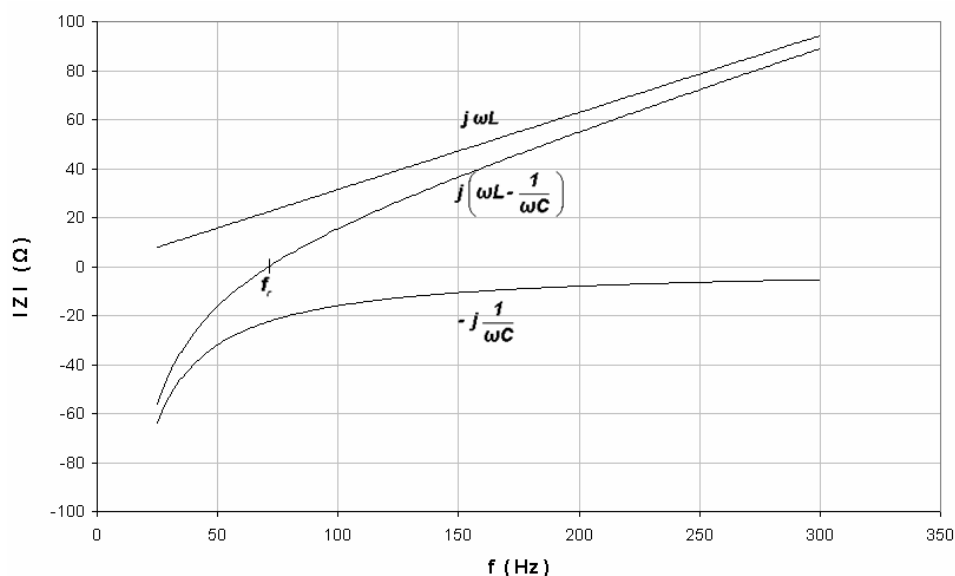
Předřadíme-li kondenzátoru ochrannou tlumivku, pak výsledný kompenzační výkon bude nižší. Je tedy nutné přepočítat instalovaný výkon uvedený na štítku (v katalogu) kondenzátoru na výkon kompenzační.

Použití kompenzačních sekcí s předřazenou ochranou tlumivkou je vhodné v průmyslových sítích napájejících spotřebiče klasické, ale především spotřebiče generující harmonické, které s ohledem na jejich velikost a dané podmínky není nutno eliminovat, jen je potřeba chránit kompenzační

kondenzátory před proudovým přetěžováním a bránit odsávání signálu HDO. Např. pro kmitočet HDO 216,67 Hz musí být kondenzátory zahrazeny s činitelem zatlumení $p = 7 \% \sim f_r = 189\text{Hz}$. [6]

3.3 Kompenzační filtry

Chceme-li, aby kompenzační zařízení plnilo zároveň funkci filtrace harmonických proudů, pak používáme výkonových sériových LC filtrů. Uspořádání je stejné jako u chráněné kompenzační sekce. Typická kmitočtová charakteristika reaktance tlumivky X_L , kondenzátoru X_C a výsledného LC obvodu je na Obr. 3.3-1.



Obr. 3.3-1 Kmitočtové charakteristiky L , C a LC

Průsečík s frekvenční osou představuje rezonanční kmitočet filtru f_r . Pro tuto frekvenci má obvod minimální impedanci danou pouze činným odporem. Pro frekvence $f < f_r$ se kompenzační filtr chová jako kompenzátor, pro frekvence $f > f_r$ vykazuje filtr charakter induktivní.

RLC obvodem prochází proud závislý na kmitočtu:

$$I = \frac{U}{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega \cdot L}{R} - \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C} \right)^2}} \quad (\text{A; V, } \Omega, \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{ H, F}) \quad (3.15)$$

V rezonanci bude obvodem procházet proud omezený pouze činným odporem, přičemž výraz pod odmocninou bude roven 1. Za tohoto předpokladu můžeme definovat činitel jakosti filtru Q :

$$Q = \frac{\omega \cdot L}{R} = \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C} \quad (-; \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{ H, } \Omega, \text{ F}) \quad (3.16)$$

Úpravou vztahu 3.15, vztaženého na proud při rezonanci dostaneme vztah proudu filtru na kmitočtu a činiteli jakosti:

$$\frac{I}{I_R} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)^2 \cdot Q^2}} \quad \left(-; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, - \right) \quad (3.17)$$

,kde výraz

$$F = \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \quad \left(-; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1} \right) \quad (3.18)$$

definujeme jako činitel rozladění. Kmitočty, při kterých klesne poměr proudů pod hodnotu $1/\sqrt{2}$ charakterizují frekvenční závislost filtru. Tuto hodnotu splňují dvě hodnoty součinu $F \cdot Q = \pm 1$.

Snížením činitele jakosti filtru pomocí zvýšení činného odporu R, dojde k zmenšení amplitudy v rezonanci, kmitočtové rozšíření rezonanční křivky se nezmění.

Snižování činitele jakosti filtru změnou poměru L/C při stejné hodnotě odporu R, vede k jeho rozladění. Tento jev nazýváme zatlumení filtru, důležitý parametr při konstrukci širokopásmových výkonových filtrů (např. při filtrování spojitých kmitočtových spekter od obloukových pecí).

Kompenzační filtry jsou připojovány do sítí, v nichž je nutné eliminovat harmonické proudy generované spotřebiči, jejichž výkon je v porovnání s ostatními dominantní. U těchto filtrů je potřeba při návrhu zohlednit nejen proud základní harmonické, pro kterou se chová jako kompenzátor, ale i proud harmonické na kterou je filtr naladěn. Prakticky se takovéto kompenzační zařízení realizuje jako několik paralelních filtrů naladěných na jednotlivé harmonické (obvykle 250, 350, 550, 650Hz).

[6], [18]

3.4 Regulace kompenzačního výkonu

Statických kompenzátorů s konstantním neregulovaným výkonem, spínaných samostatným spínačem, nebo společně s kompenzovaným spotřebičem lze využít při individuální kompenzaci.

V případě skupinové, nebo centrální kompenzace je nezbytné přizpůsobit výkon kompenzačního zařízení okamžitému odebíranému jalovému výkonu. Je tedy nutné vyhodnotit účinník a provést regulaci k dosažení požadovaného stavu.

Statické kompenzační zařízení je možné ovládat buď stupňovitě prostřednictvím kontaktních, bezkontaktních spínačů, nebo plynulým řízením proudu dekompenzačního členu.

Pro samočinnou regulaci se využívají automatické regulátory jalového výkonu. Na trhu je široká nabídka regulátorů pro stupňovité kontaktní i bezkontaktní ovládání (např. FCR – výrobce BMR, BR 6000 – Epcos, Estamat – Roderstein, Novar – KMB, Redware – Navaris, RM – Frako a další).

Plynulé řízení jalového výkonu statické kondenzátorové baterie je možné realizovat fázovým řízením proudu odebíraného paralelně připojenou tlumivkou. [17]

3.4.1 Stupňovitě spínané kompenzátory

Pro správnou funkci stupňovitě spínané kompenzace je nutné vhodně zvolit počet a velikost jednotlivých stupňů. Volba počtu stupňů se odvíjí od velikosti jednoho stupně, celkovém potřebném kompenzačním výkonu a hodnotě vykompenzování (obvykle $\cos \varphi \geq 0,95$, nebo-li $\tan \varphi \geq 0,33$).

Bude-li výkon jednotlivých stupňů Q_{CI} stejný, pak k dosažení požadovaného $\tan \varphi$, při induktivním výkonu zátěže Q_L a činném výkonu P , bude potřeba N stupňů kompenzátoru.

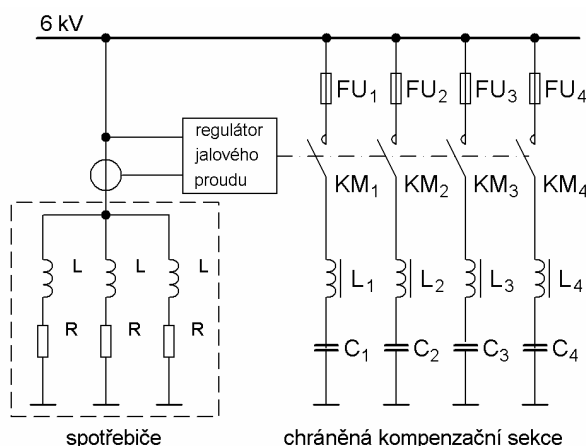
$$N \geq \frac{Q_L - P \cdot \tan \varphi}{Q_{CI}} \quad (-; \text{var, W, } ^\circ) \quad (3.19)$$

Pro nízkonapěťové aplikace se navrhuje 6 až 12 stupňů spínaných co nejehospodárněji s minimálním počtem operací. Rovnoměrné zatížení je zajištěno tzv. kruhovým spínáním. Tzn. přepínání nejdéle odpojeného kondenzátoru – systém FIFO (first in, first out).

Pro vysokonapěťové aplikace by však takovéto řešení bylo ekonomicky náročné (pro každý stupeň potřebujeme jeden rozvaděč). Proto jednotlivé stupně tvoří odstupňované váhy (např. 1 : 2 : 4).

- **Kontaktní**

Speciální stykače připínají kondenzátory k síti na povel regulátoru jalového výkonu. Při použití klasických stykačů hrozí vznik značných přechodových jevů po připnutí k síti v nevhodném okamžiku. Proudové rázy mohou dosahovat až stonásobku jmenovitého proudu s kmitočtem nad 10 kHz. Dochází tak k rušivým jevům, ovlivňujících elektronická zařízení připojená k téže síti. Přechodový jev je možné eliminovat použitím ochranných tlumivek, stykačů s odporovým spínáním (aplikace nn), nebo bezkontaktními spínacími prvky.



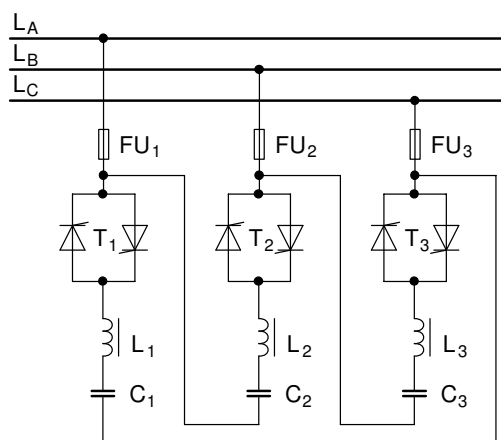
Obr. 3.4-1 Stupňovitě spínaná kompenzace

Kontaktní stupňovitě řízené kompenzátory s prostými kondenzátory lze využít v sítích, kde se nevyskytují harmonické složky proudu a zároveň nejsou kladeny vysoké nároky na rychlost kompenzace. Pro síť s velkým energetickým rušením, kde hrozí přetěžování kondenzátorů a tam, kde síť tvoří spolu s kondenzátory rezonanční obvod pro kmitočet HDO, je potřeba použít kondenzátory chráněné, viz Obr. 3.4-1.

- **Bezkontaktní**

Jsou vhodné pro průmyslové provozy, kde dochází k spínání indukčních spotřebičů na velmi krátkou dobu v rychle se opakujících intervalech. Jedná se například o svařování, lisování, odstředování, střihání, spouštění a brzdění velkých motorů. Stykače jsou v těchto případech nevyhovující a jsou nahrazeny polovodičovými prvky. Přípustná četnost spínání je omezena pouze frekvencí sítě. Teoreticky je možné dosahovat spínací frekvence 50 Hz, při reakci regulátoru do 20ms.

Takováto spínací frekvence je dosažitelná, pokud k připínání kondenzátoru dochází v maximu napětí, při nabitém kondenzátoru. Jedná se o ideální spínání bez přechodných jevů, avšak technicky obtížně realizovatelné. Kompenzátor musí být vybaven zařízením pro neustálé dobíjení kondenzátorů. Proto je častěji realizováno připínání kondenzátoru při průchodu napětí nulou a za nulových počátečních podmínek napětí. Pro tento způsob musí být k dispozici rychlo-vybíjecí tlumivky. Tím se snižuje teoretická četnost spínání. Přechodný jev je mírný, amplituda dosahuje maximálně 1,6 násobku ustálené hodnoty.



Obr. 3.4-2 Jeden stupeň tyristorově spínaného kompenzačního zařízení

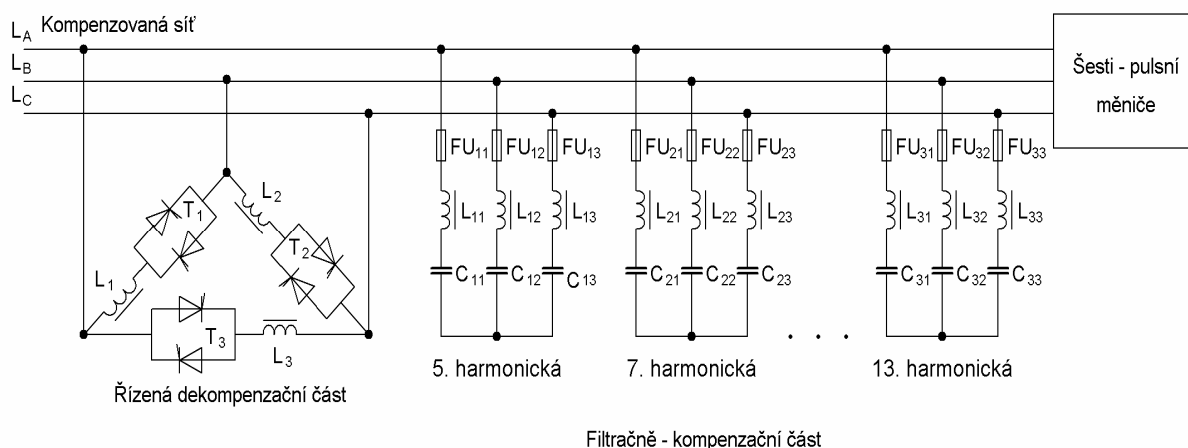
Na Obr. 3.4-2 je jeden stupeň tyristorově spínané kompenzace. Kondenzátorová baterie je v chráněném provedení, jednak pro omezení rázů, ale hlavně k zabránění přetěžování kondenzátorů. Při rychlém spínání indukčních spotřebičů totiž dochází k harmonickému rušení. Další tlumivky se připojují paralelně ke kondenzátorům a slouží jako vybíjecí. Zapojení mezi fázemi vyžaduje dimenzování kondenzátorů na sdružené napětí, rovněž je potřeba respektovat zvýšené napětí vlivem předřazených tlumivek. [6], [18]

3.4.2 Plynule řízené kompenzátory

V provozech, kde dochází k rychlým změnám kompenzačního výkonu a zároveň velké produkci harmonických nad mez stanovenou normou (např. bodové svářeční automaty, řízené pohony odstředivek v cukrovarech, pohony válcovacích tratí, obloukové pece) se ke kompenzaci a filtraci používají plynule řízené kompenzační filtry.

Zdrojem kapacitního výkonu je soustava paralelně řazených kompenzačních filtrů. Plynulou regulaci obstarává paralelně zapojená dekompenzační tlumivka, jejíž proud je řízen fázově spínaným tyristorovým spínačem. Vyžaduje-li se regulace v celém rozsahu od minima k maximu, daného velikostí kapacity, musí jalový výkon tlumivky odpovídat kapacitnímu výkonu kondenzátorové baterie.

Při trojfázovém zapojení (většina realizací) se dekompenzační člen zapojuje do trojúhelníka. Zmenší se tak zpětný vliv na kompenzovanou síť. Řízením tlumivek jsou generovány proudové harmonické, přičemž nejnižší je třetí. Harmonické násobku tří se však v trojúhelníku kompenzují a v proudu tekoucím do regulačního členu ze sítě je nejnižší pátá harmonická. I přesto fázově řízený spínač generuje do sítě 20 % harmonických spotřebiče.



Obr. 3.4-3 Plynule řízený kompenzátor s dekompenzačním členem

Na Obr. 3.4-3 je zapojení plynule řízeného kompenzátoru eliminujícího vliv šestipulsního měniče. LC filtry zajišťují filtraci harmonických soustavy, kterou kompenzují i vlastní kompenzátor. Měnič generuje charakteristické harmonické s kmitočtem $6n \pm 1$. Velikost proudů vyšších harmonických s řádem exponenciálně klesá. V praxi se používá v každé fázi kompenzační filtr pro 5., 7., 11., a 13. harmonickou. 17. a 19. harmonická má už tak malou velikost, že ji není potřeba filtrovat. Vhodné je poměrné rozdělení kompenzačního výkonu. Pro řízený šestipulsní usměrňovač a zmíněné harmonické v poměru 3 : 2 : 1 : 1.

Plynule řízený kompenzační filtr je svou jemnou a dynamickou regulací pro kompenzaci a filtraci nejlepším, avšak investičně i provozně nejnáročnějším řešením. [6], [7]

4 Analýza sítě válcovny předvalků a hrubých profilů

Pro správný návrh kompenzačního výkonu, způsobu a rychlosti regulace, rozhodnutí o koncepci s hradíci tlumivkami, nebo filtry, je potřeba analyzovat síť v místě připojení budoucího kompenzačního zařízení. Tzn. provést měření na hladině 6 kV rozvodny R2. Rozvodna zajišťuje napájení pohonů blokovny, vratných tratí, podružných rozvaděčů R3.2 a R3.1 (pomocné pohony blokovny a vratných tratí, strojovna, čerpadla pro ostřik okují, osvětlení,...) dle přehledového schéma uvedeného v příloze č. 1. Podrobnější popis je uveden v kapitole 2.2 *Napájení válcovny předvalků a hrubých profilů*.

4.1 Teoretický rozbor sítě

Největší zatížení rozvodny R2 představují stejnosměrné stroje (pohony válcovacích stolic a blokovny) napájené řízenými usměrňovači. Usměrňovače v dvanáctipulzním provedení jsou tvořeny dvěma šesti-pulzními můstky. Napájení je z trojvinutových transformátorů vn/nn, kde jedno sekundární vinutí je zapojeno do hvězdy a druhé do trojúhelníka. Takovéto uspořádání se vyznačuje nízkými úrovněmi harmonických. Každý můstek generuje harmonické v řádu $6n \pm 1$, přičemž fázová napětí sekundárních vinutí jsou pro 5., 7., 17., 19. harmonickou v protifázi a dochází k jejich eliminaci. Podmínkou je 30° fázový posun mezi sekundárními fázovými napětími.

S ohledem na dynamický provoz lze očekávat četné odchylky napájecího napětí a velké zatížení sítě jalovým výkonem, následně špatný účinník (při měření jsou stávající kompenzace odstaveny). Účinník odběru řízeného usměrňovače je závislý na řídicím úhlu α dle vztahu:

$$\cos \varphi = \cos \alpha \quad (4.1)$$

To znamená, že může nabývat hodnot blízkých 1 v oblasti malých úhlů řízení – max. stejnosměrné napětí, ale i hodnot pod 0,2 při regulaci otáček k nízkým hodnotám – úhel řízení vzrůstá, účinník klesá. Očekáváme tedy kolísavý účinník odběru od hodnot minimálních, až po hodnoty kolem 0,9. Tato mez nebyvá překročena díky komutačnímu jalovému výkonu, který vzniká fázovým posunem proudu a napětí při komutaci. Z hlediska účinníku asynchronních motorů platí, že účinník při chodu naprázdno, nebo při chodu s nižším zatížením je vždy horší, než při zatížení jmenovitém.

K optimálnímu návrhu je nezbytné získat informace o *účinníku*, časovém odběru *činného*, *jalového výkonu* kompenzovaných spotřebičů a *charakteristikách sítě* stanovených ČSN 61000-2-4. Tato norma rovněž poskytuje kompatibilní úroveň rušení v napájecím bodě uvnitř průmyslových závodů (IPC) a jiných neveřejných sítích. Pro účel návrhu kompenzace budou posuzovány kompatibilní úroveň *odchylek napětí*, *nesymetrie*, *harmonických napětí*, *celkového harmonického zkreslení*.

K měření charakteristik sítě a dalších parametrů byl použit Analyzátor C.A 8334. Popis měřicího přístroje je uveden v kapitole 4.3. Vyhodnocení dat je provedeno v souladu s normami ČSN 61000-2-4 a ČSN 50160.

4.2 Kompatibilní úrovně v průmyslových závodech

Kompatibilní úrovně pro průmyslové a neveřejné střídavé distribuční sítě jmenovitého napětí do 35 kV a kmitočtu 50, nebo 60 Hz poskytuje norma ČSN 61000-2-4 ed.2. Z hlediska průmyslových závodů se jedná o úrovně stanovené v tzv. napájecím bodu uvnitř závodu (IPC).

Kompatibilní úroveň je definována jako úroveň rušení, která nepřekročí 95 % naměřených hodnot v celé síti. Tyto úrovně jsou uvedeny pro různé třídy elektromagnetického prostředí určeného charakteristikami sítě.

- **Třída 1** určuje úrovně pro chráněná napájení. Tyto jsou nižší než úrovně pro veřejné rozvodné sítě. Jedná se o zařízení velmi citlivé na rušení v napájecí síti (např. přístrojové vybavení laboratoří, některá ochranná a automatizační zařízení, počítače atd.)
- **Třída 2** určuje úrovně pro společné napájecí body veřejné rozvodné sítě (PCC) a body uvnitř vyšetřované sítě (IPC) v průmyslovém prostředí. Kompatibilní úrovně jsou identické s úrovněmi pro veřejné rozvodné sítě.
- **Třída 3** určuje úrovně výhradně pro body IPC v průmyslovém prostředí. Třidu je nutno uvažovat např. při napájení většiny zátěží přes měniče frekvence, provozu svářeček (svařovací lisy, bodovky), rozbíhání velkých motorů, nebo jiném dynamickém zatížení.

Z hlediska normy jsou posuzovány následující charakteristiky:

- **Dočasné odchylky síťového kmitočtu**

Kompatibilní úrovně v průmyslových závodech odpovídají kompatibilním úrovním odchylek síťového kmitočtu ve veřejných distribučních sítích. Standardně je za kompatibilní považována odchylka ± 1 Hz od jmenovitého kmitočtu.

- **Odchylky napětí**

Kondenzátory jsou vyráběny s přesně stanovenou tolerancí, po kterou snesou zvýšené napětí. Překročením tolerance dochází k nadměrnému oteplení a snížení jejich životnosti. Podle mezinárodních a evropských norem jsou dovolená přepětí stanovena takto:

- $U_N + 10$ % max. 8 hodin za 24 hodin
- $U_N + 15$ % max. 30 minut za 24 hodin
- $U_N + 20$ % max. 5 minut za 24 hodin
- $U_N + 30$ % max. 1 minuta za 24 hodin

Norma určuje přesné odchylky pro jednotlivé třídy dle Tab. 4.2-1. Pro třídu 3 se předpokládají odchylky v rozsahu $0,85 U_N$ až $0,9 U_N$ při trvání ne delším než 60 s, pro delší doby trvání v rozsahu $0,9 U_N$ až $1,1 U_N$.

- **Nesymetrie napájecího napětí**

Je stav trojfázové sítě, při kterém efektivní hodnoty sdružených napětí, nebo rozdíly fázových úhlů mezi po sobě jdoucími fázemi nejsou stejné. Vyjadřuje se jako poměr zpětné a sousledné složky.

- **Harmonické**

Kondenzátor vykazuje pro harmonické menší reaktanci. Výsledkem je jejich proudové přetěžování, přehřívání a zkrácení životnosti. Pro rozhodnutí, zda má být kompenzační zařízení realizováno jako klasické, chráněné či filtrační je nutný důsledný rozbor harmonických v síti.

Kompatibilní úrovně stanovené normou se vztahují k ustálenému stavu harmonických a jsou uvedeny jak pro dlouhodobé, tak i pro krátkodobé účinky. Za dlouhodobé se považují účinky harmonických trvajících 10 a více minut. Hodnoty kompatibilních úrovní pro dlouhodobé účinky jsou stanoveny v Tab. 4.2-2. Odpovídající údaje pro celkové harmonické zkreslení udává Tab. 4.2-3. [13]

Tab. 4.2-1 Kompatibilní úrovně pro odchylky napětí, kmitočtu sítě a nesymetrie napětí

Rušení	Třída 1	Třída 2	Třída 3
Odchylky kmitočtu	$\pm 1 \text{ Hz}$	$\pm 1 \text{ Hz}$	$\pm 1 \text{ Hz}$
Odchylky napětí od jmenovité hodnoty U_N	+ 8 %	$\pm 10 \text{ %}$	+10 % až -15 %
Nesymetrie napětí	2 %	2 %	3 %

Tab. 4.2-2 Kompatibilní úrovně pro harmonické složky napětí U_h

Řád harmonické	Třída 1	Třída 2	Třída 3
<i>lichého řádu - mimo násobky 3</i>	$U_h (\text{ % })$	$U_h (\text{ % })$	$U_h (\text{ % })$
5	3	6	8
7	3	5	7
11	3	3,5	5
13	3	3	4,5
17	2	2	4
$17 < h \leq 49$	$2,27 \times (17/h) - 0,27$	$2,27 \times (17/h) - 0,27$	$4,5 \times (17/h) - 0,5$
<i>lichého řádu - násobky 3</i>	$U_h (\text{ % })$	$U_h (\text{ % })$	$U_h (\text{ % })$
3	3	5	6
9	1,5	1,5	2,5
15	0,3	0,4	2
21	0,2	0,3	1,75
$21 < h \leq 45$	0,2	0,2	1

Tab. 4.2-3 Kompatibilní úrovně pro celkové harmonické zkreslení

Rušení	Třída 1	Třída 2	Třída 3
Celkové harmonické zkreslení napětí ($THDu$)	5 %	8 %	10 %

4.3 Analyzátor elektrických sítí QUALISTAR – C.A 8334

K analýze sítě byl použit analyzátor C.A 8334 od firmy CHAUVIN ARNOUX. Třífázový analyzátor umožňuje získat charakteristiky střídavých i stejnosměrných elektrických sítí. Přístroj je schopen měřit více parametrů, současně zpracovávat měřicí funkce, detekovat změny, provádět průběžný záznam a zobrazování údajů. Napájení je buď z vestavného akumulátoru, nebo sítě 230 V.

Funkce přístroje jsou členěny do šesti pracovních režimů (měření, harmonická analýza, výkonová analýza, sledování přechodných dějů, režim záznamů a alarmů).

Měřicí funkce:

- měření střídavých fázových napětí (skutečné efektivní hodnoty TRMS) do 480 V, nebo sdružených hodnot do 960 V v sítích dvou-, tří- a čtyř-vodičových.
- měření střídavých proudů (efektivní hodnoty TRMS) do 6500 A
- měření frekvence sítě 50 a 60 Hz (od 10 Hz do 70 Hz)
- výpočet proudu v nulovém vodiči vektorovým sčítáním fázových proudů v zapojení do Y
- výpočet činitele výkyvu proudu a napětí
- výpočet činitele K pro proudové transformátory
- výpočet krátkodobé nestability (flickru) napětí
- výpočet fázové nesymetrie pro napětí a proud
- měření úhlu a poměru harmonických (vzhledem k základní hodnotě, nebo vzhledem k efektivní hodnotě TRMS) pro napětí, proud, nebo výkon až do úrovně 50-té harmonické. Výpočet celkového harmonického zkreslení THD.
- měření činného, jalového a zdánlivého výkonu pro jednotlivé fáze a jejich součet. Výpočet výkonu, posuvu a ztrátového činitele. Souhrn energií od okamžiku zvoleného operátorem.
- sledování střední hodnoty kteréhokoliv parametru výpočtem pro zvolenou periodu od 1 sekundy do 15 minut Uložení hodnot do paměti přístroje po neomezenou dobu.
- vzestup, poklesy, přerušení, či překročení výkonu a hranice harmonických.
- detekce přechodných dějů a záznam jejich průběhů

Bližší specifikaci přístroje (typy snímačů, chyby měření, programové vybavení, respektované normy při měření, atd.), lze zjistit z manuálu na stránkách výrobce. [14]

4.4 Výsledky měření

Následující výsledky naměřených hodnot a průběhů budou výchozím podkladem při návrhu kompenzačního zařízení.

V průběhu jednoho týdne byly za běžného provozu v měřicím intervalu jedné minuty snímány data síťovým analyzátozem C.A 8334 připojeným k přípojnicím rozvodny R2 přes měřicí transformátory proudu a napětí. Přístroj zaznamenával, popřípadě dopočítával tyto veličiny:

- kmitočet sítě
- napájecí napětí, proud (efektivní hodnoty)
- činný, jalový a zdánlivý výkon (fázové a součtové hodnoty)
- harmonická napětí
- celkové harmonické zkreslení napětí a proudu
- účinník dPF (*displacement Power Factor*) a opravdový účinník PF (*Power Factor*)

Dále z naměřených hodnot byla určena nesymetrie napájecího napětí a nesymetrie zatížení.

Naměřená data byla exportována do tabulkového procesoru Microsoft Excel s následným zpracováním a vykreslením průběhů veličin a sloupcových grafů. Pro srovnání naměřených údajů s normou byly vyhodnoceny 95 % hodnoty (pomocí funkce LARGE), pokud není uvedeno jinak.

4.4.1 Odchyly síťového kmitočtu

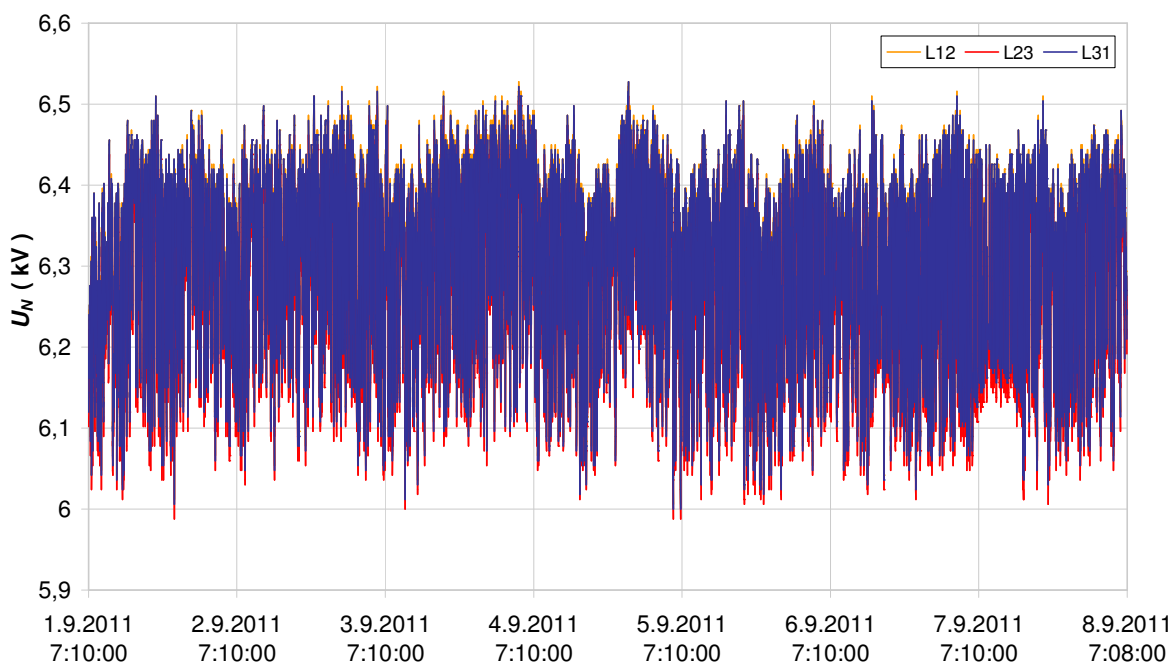
Kmitočet je celosystémový parametr. Měření potvrdilo, že kompatibilní úroveň stanovená ČSN EN 61000-2-4 je plnohodnotně splněna. Odchylka síťového kmitočtu nebude nikterak ovlivňovat návrh kompenzátoru.

4.4.2 Odchyly napětí

Za normálních provozních podmínek, s vyloučením přerušení napájení, musí být během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot napájecího napětí (v stanovených intervalech) v rozsahu $U_N \pm 10 \%$.

Na základě průběhů efektivních hodnot napětí na Obr. 4.4-1 můžeme konstatovat, že tolerance $\pm 10 \% U_N$ není překročena v žádném okamžiku z celého průběhu měření. Při vyhodnocení 95 % hodnot byly zjištěny odchylky od napájecího napětí $U_N = 6,3 \text{ kV}$ v rozmezí od -228 V do $+174 \text{ V}$. To odpovídá odchylce $-3,6 \% U_N$ až $+2,5 \% U_N$.

Srovnáním naměřeného průběhu s mezinárodně stanovenými tolerancemi přepětí u kondenzátorů (viz. kapitola 4.2) je zřejmé, že limity nejsou překročeny a při odpovídajícím jmenovitém napětí je možné použít standardně vyráběné kondenzátory vn.



Obr. 4.4-1 Časový průběh efektivních hodnot napětí U_N

4.4.3 Nesymetrie napájecího napětí

Za normálních provozních podmínek musí být v každém týdnu 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot zpětné složky napájecího napětí v rozsahu $0 \div 3 \%$ (dle třídy) složky sousledné.

Při měření nebyl parametr sledován, proto je jeho hodnota určena výpočtem. Za předpokladu shodných fázových úhlů mezi po sobě jdoucími fázovými napětími, lze použít pro nesymetrii efektivních hodnot sdružených napětí vztah udávaný ČSN 61000-2-4.

$$\rho = \sqrt{6 \cdot \frac{U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2}{(U_{12} + U_{23} + U_{31})^2} - 2} \quad (4.2)$$

,kde U_{12} , U_{23} , U_{31} jsou sdružená napětí.

Vyhodnocená 95 % úroveň desetiminutových středních efektivních hodnot zpětné složky činí 0,3 % sousledné složky.

4.4.4 Nesouměrnost zátěže

Z naměřených údajů je zjištěno, že maximální hodnota odchylky od střední hodnoty výkonu (P , Q , S) je v 95 % případů menší než 5 %. Proto uvažují pro návrh kompenzačního zařízení souměrné zatížení. Řízení jalového výkonu bude tedy trojfázové, tzn., že postačující bude vyšetření součtových hodnot naměřených výkonů.

4.4.5 Průběh činného a jalového výkonu

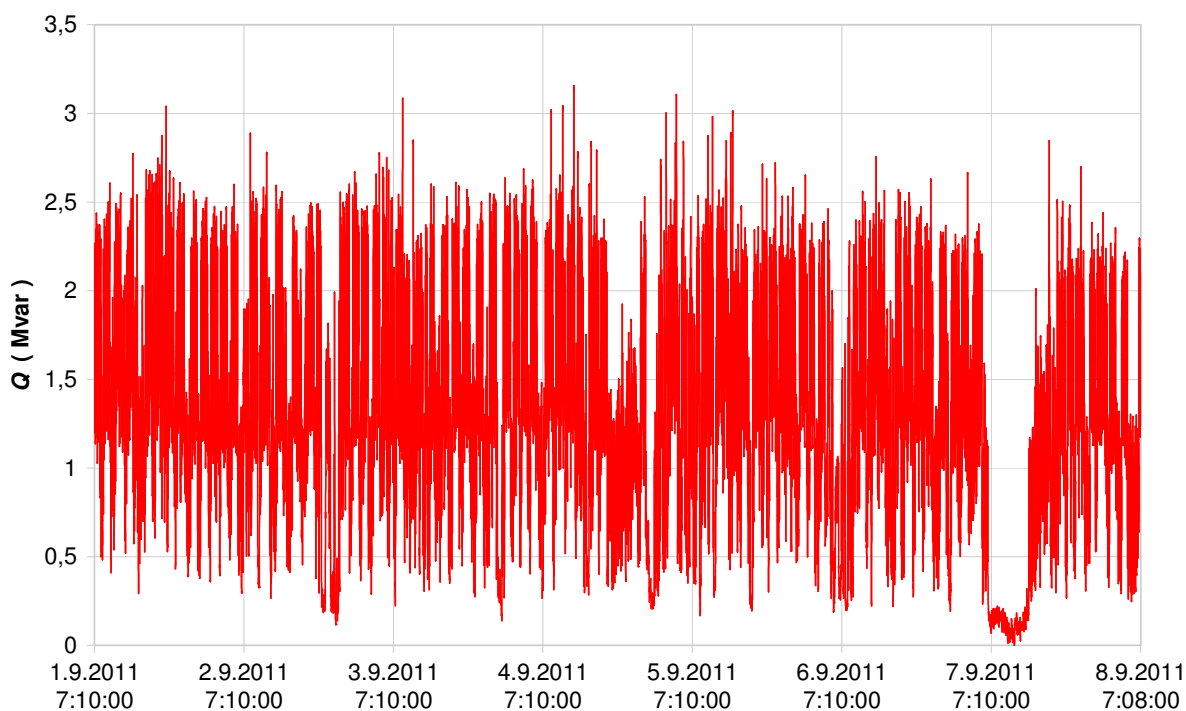
Průběhy součtových činných a jalových výkonů na Obr. 4.4-2 až Obr. 4.4-6 jsou směrodatné při určování požadavků na kompenzační výkon, druh a rychlost regulace.

Poměr jalového a činného výkonu udává bezrozměrné číslo $\tan \phi$. Je to rozhodující faktor pro výpočet přírážky za nevykompenzovaný výkon, avšak při posouzení odběru jalového výkonu je srozumitelnější přihlédnout k účinníku $\cos \phi$ (viz. kapitola 4.4.7). Pro přehlednější orientaci v odběru jalového výkonu jsou v Tab. 4.4-1 uvedeny časy, během kterých se hodnota výkonu nacházela v určitém rozmezí.

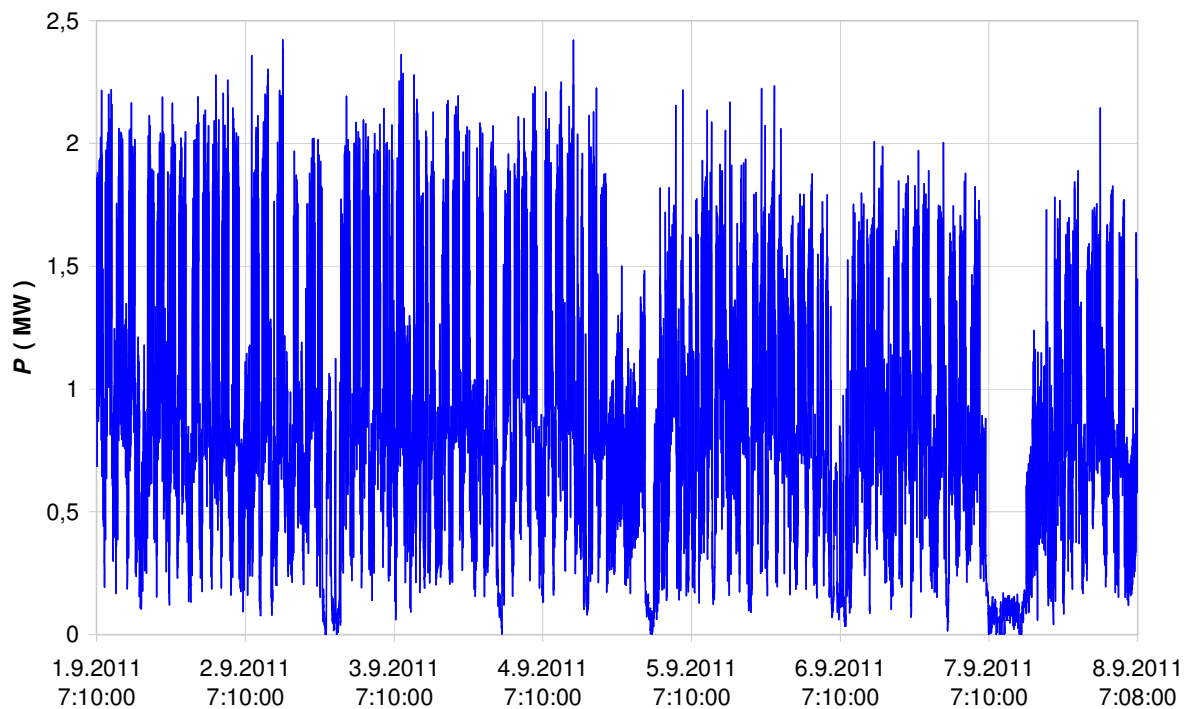
Tab. 4.4-1 Údaje o odběru jalového výkonu Q v měřeném období

oblast Q	četnost odběrů v oblasti Q	čas	
(Mvar)	(%)	(hod.)	(min.)
< 0,5	12,9	21	40
0,5 ÷ 1	18,3	30	45
1 ÷ 1,5	30,8	51	45
1,5 ÷ 2	21,1	35	27
2 ÷ 2,5	15,3	25	42
2,5 ÷ 3	1,5	2	31
> 3	0,1	-	10

Jelikož požadovaný účinník odběru při kompenzaci je dán deficitem jalového výkonu a současně hodnotou činného výkonu, bude nutné provést i rozbor činného odběru v síti (Tab. 5.2-1).

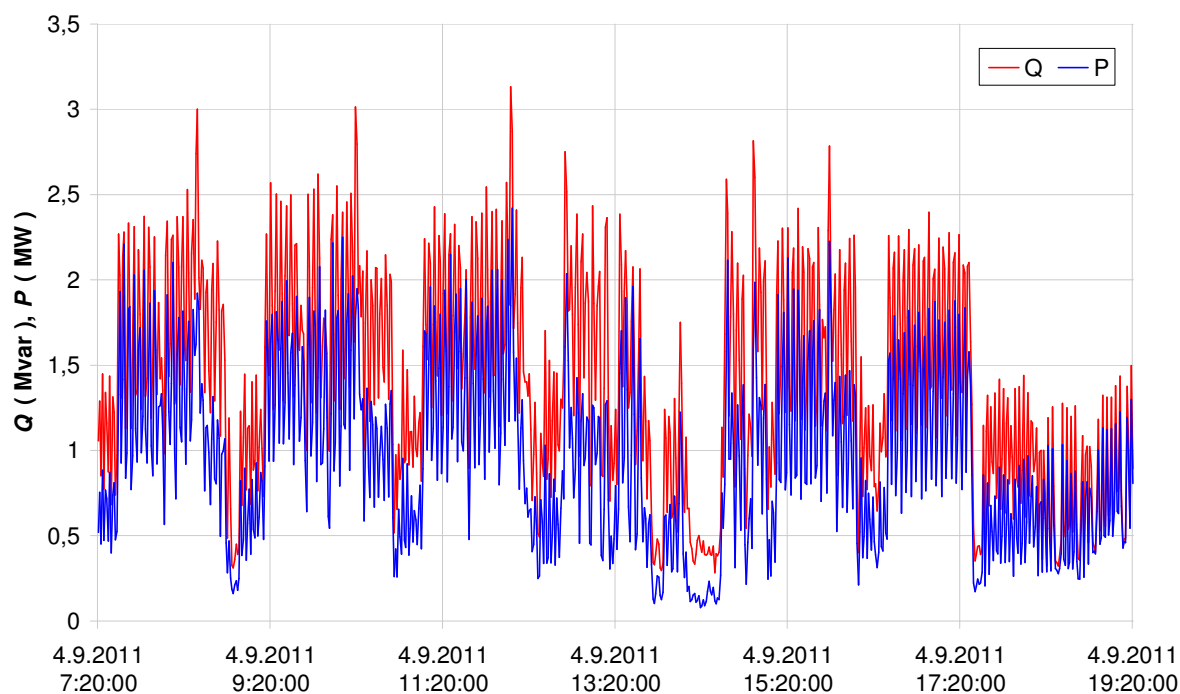


Obr. 4.4-2 Časový průběh jalového výkonu



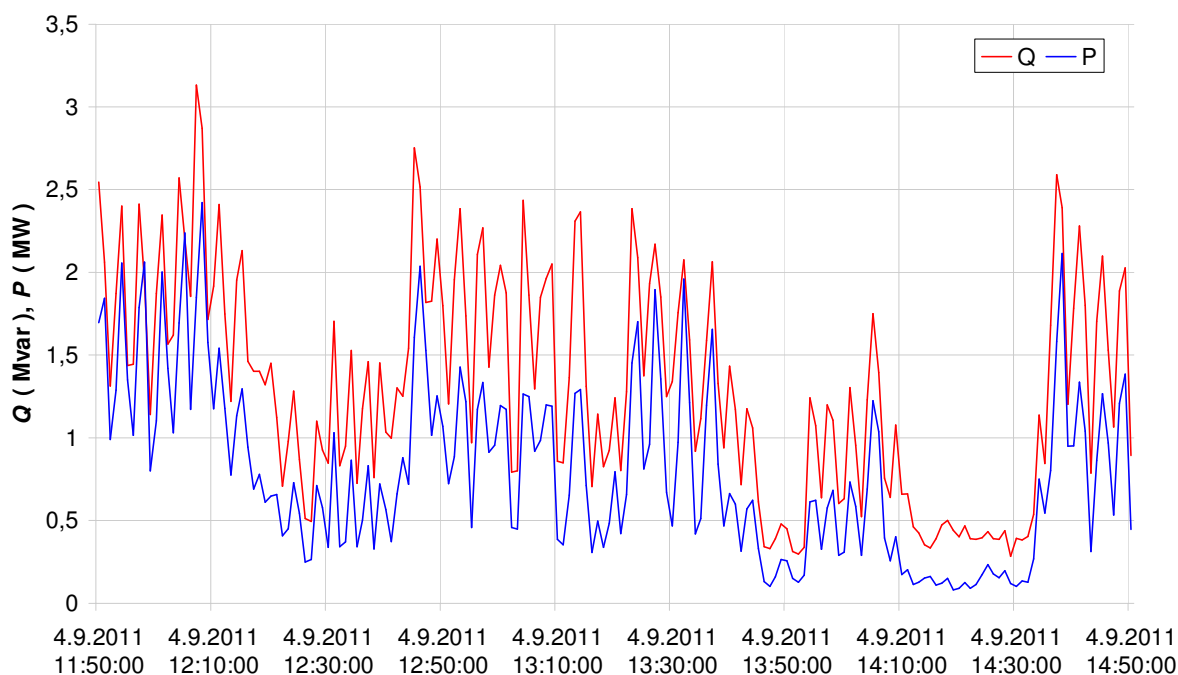
Obr. 4.4-3 Časový průběh činného výkonu

Z průběhů činného a jalového výkonu lze rozpoznat, že odběry mají podobné cyklicky se opakující oblasti, jak je blíže znázorněno na Obr. 4.4-4.

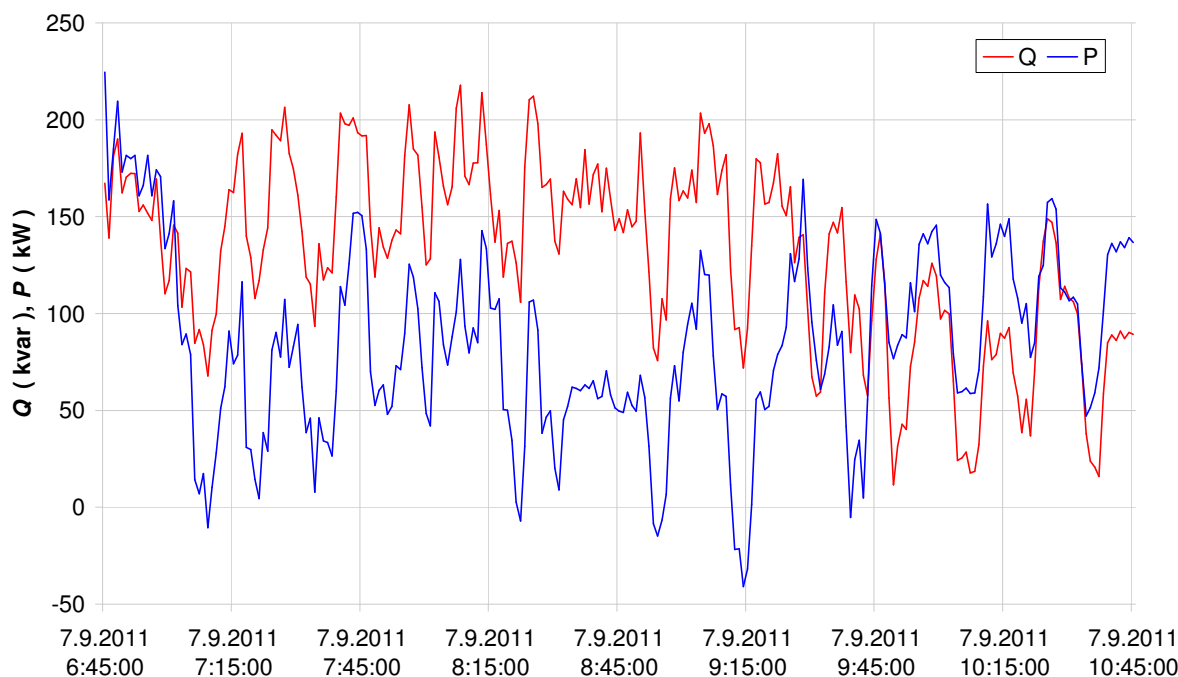


Obr. 4.4-4 Časové průběhy výkonů pro bližší posouzení

Na následujících grafech jsou vybrány úseky, které je potřeba zvlášť zohlednit. Na Obr. 4.4-5 je vynesena oblast, v níž dochází k největším změnám zatížení a na Obr. 4.4-6 je oblast s minimálním odběrem v měřeném období.



Obr. 4.4-5 Časový průběh výkonů v úseku největších změn zatížení

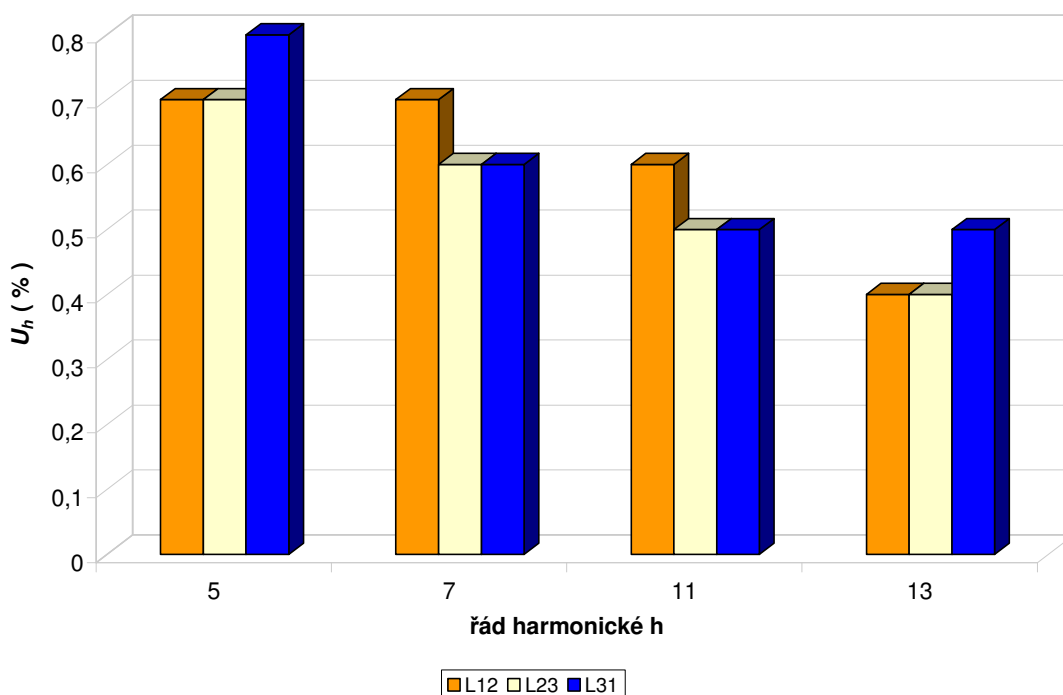


Obr. 4.4-6 Časový průběh výkonů v úseku s minimálním odběrem

4.4.6 Harmonické

Vliv harmonických určuje, zda budou kompenzační kondenzátory prostřednictvím tlumivek naladěny na příčné harmonické k jejich eliminaci, nebo zda bude postačující kondenzátory vhodně zahradit.

Z hlediska kompatibilních úrovní nemá napětí harmonických za normálních provozních podmínek v 95 % deseti-minutových průměrů efektivních hodnot, (v tomto případě byl interval měření 1 minuta) jednotlivých harmonických v libovolném týdenním intervalu, překročit velikosti uvedené v Tab. 4.2-2. Na Obr. 4.4-7 jsou vyneseny 95 % hodnoty harmonických napětí. K posouzení kompatibility uvažují druhou třídu elektromagnetického prostředí, která pro 5. harmonickou definuje max. harmonické napětí U_h ve výši 6 % U_N , pro 7. harmonickou 5 %, pro 11. harmonickou 3,5 % a pro 13. harmonickou 3 % U_N .



Obr. 4.4-7 Harmonická napětí v síti

Poměr efektivní hodnoty obsahu harmonických střídavé veličiny k efektivní hodnotě základní harmonické udává činitel harmonického zkreslení napětí (obdobně proudu).

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} U_h^2}}{U_N} \cdot 100 \quad (\%; V, V) \quad (4.3)$$

,kde U_h je efektivní hodnota napětí h-té harmonické a U_N je ef. hodnota napětí základní harmonické

Celkový činitel harmonického zkreslení napájecího napětí $THDu$ (zahrnující všechny harmonické až do řádu 40) musí být menší nebo roven 8 % po 95 % času libovolné týdenní periody.

Vyhodnocené 95 % hodnoty $THDu$ a $THDi$ z naměřených dat jsou v Tab. 4.4-2:

Tab. 4.4-2 Úrovně $THDu$ a $THDi$

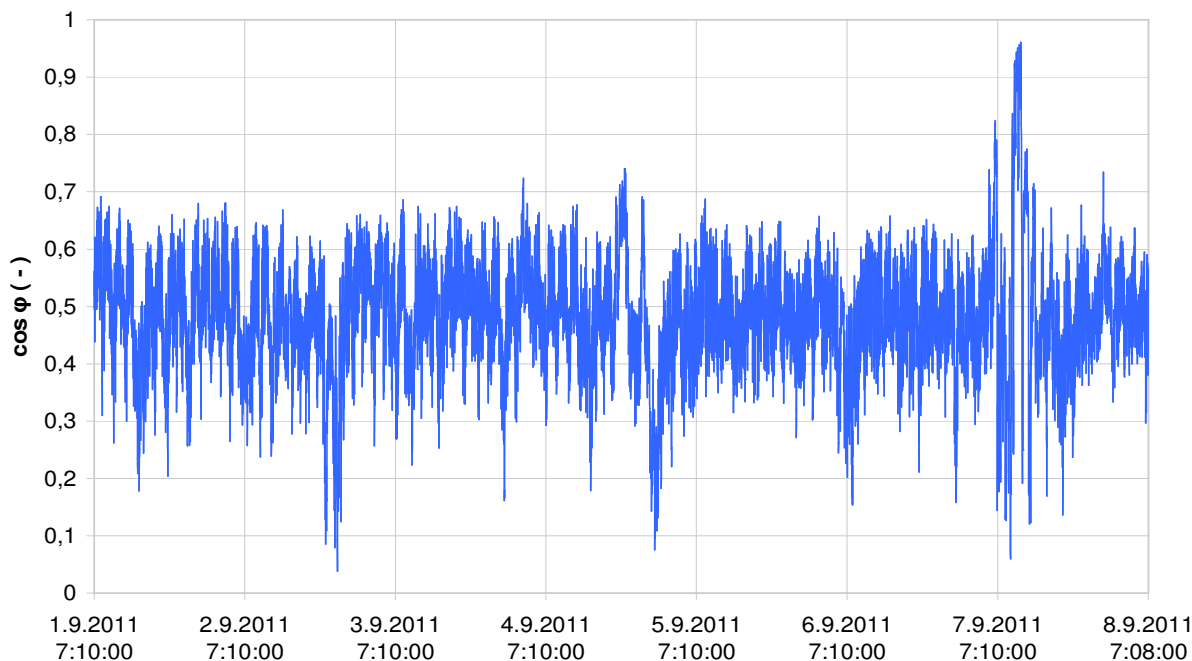
	$L_{1(2)}$	$L_{2(3)}$	$L_{3(1)}$
$THDu$ (%)	1,5	1,5	1,6
$THDi$ (%)	25,8	22,3	22

Hodnota celkového činitele harmonického zkreslení napětí splňuje příslušnou normu s vysokou rezervou. Pro proud norma neuvádí maximální přípustnou hodnotu $THDi$, respektive velikost jejich složek. Harmonické proudy však způsobují nárůst špičkové a efektivní hodnoty proudu, jak je blíže uvedeno v Tab. 5.5-1.

4.4.7 Průběh účinníku

Z naměřených dat jsem vyhodnotil střední hodnotu účinníku $\cos\varphi$, tedy kosinus fázového posunu mezi 1. harmonickou napětí a proudu a účinník opravdový $\cos\lambda$, zahrnující tzv. deformační výkon, tedy vliv harmonických proudů a napětí. Vzhledem k nízkému činiteli harmonického zkreslení lze oba účinníky považovat za identické.

Účinník v síti je na velmi špatné úrovni. Po převážnou část měření se pohyboval v nízkých hodnotách pod hranicí 0,7, výjimečné nebyly ani situace s $\cos\varphi < 0,3$. Při takto nízkých hodnotách jsou ztráty způsobené jalovou složkou proudu více než desetinásobné, oproti ztrátám způsobených složkou činnou. Pokud je vypočtený účinník z naměřených hodnot el. energie menší, než 0,95, platí konečný zákazník provozovateli distribuční soustavy cenovou přírážku, která je stanovena podle typu sazby a je uvedena v procentech platby za výkon a elektrickou energii. Přírážka je stanovena v rozmezí 1,12 % až 100 % úměrně účinníku $0,94 \div 0,5$, nejsou-li dohodnuty jiné podmínky.



Obr. 4.4-8 Průběh účinníku $\cos\varphi$

5 Výběr optimální varianty a její technické řešení

Na základě výsledků měření můžeme navrhnout optimální způsob kompenzace jalového výkonu pro rozvodnu R2.

Varianta rotačního kompenzátoru, nebo statického synchronního kompenzátoru (STATCOM) – řízený polovodičový měnič byla vyloučena s odůvodněním uvedeným v kapitole 3 *Možnosti kompenzace rozvodny R2*. Jako vhodná varianta se nabízí kompenzace statickými kompenzátory.

Analýzou sítě bylo zjištěno, že celkový činitel harmonického zkreslení napětí je $< 2 \%$. Kompenzátor tedy není nutno koncipovat jako filtr. Podle ustanovení PNE 33 3430-6 *Omezení zpětných vlivů na HDO* je nutno hradit kompenzační zařízení, pokud je jejich celkový kompenzační výkon vyšší než 35% napájecího transformátoru. To sice není náš případ, ale pro vyvarování se možným rezonancím a přetěžování kondenzátorů, bude realizováno zahrazení kmitočtu HDO a patřičných harmonických.

Z hlediska řízení je nejvhodnější zvolit plynule regulovanou kompenzaci, tedy řízení proudu dekompenzační tlumivkou s paralelně řazenou kondenzátorovou baterií (TCR+FC). Alternativu by mohla poskytovat varianta kombinovaného řešení v podobě stupňovitě spínané kompenzace s poměrně velkými stupni, přičemž nevykompenzovanou oblast by hradila plynule regulovatelná část. Realizace plynule regulovatelných zařízení je však odůvodnitelná pouze v případech, kdy je nutné kompenzovat kromě jalového výkonu i další parametry sítě (harmonické, flickr, nesymetrii, kolísání napětí,...). Pro samotnou kompenzaci induktivního výkonu je toto řešení *nehospodárné*.

Vyloučením výše uvedených variant se rozhodování omezí na výběr stupňovitě řízené kompenzace v kontaktním, nebo bezkontaktním provedení.

Varianta bezkontaktního spínání pomocí polovodičů by jistě poskytovala eliminaci negativních jevů spojených s kontaktním spínáním a zvýšení životnosti celého zařízení. *Zásadní význam* při výběru kompenzace mají finanční možnosti investora. Proto navrhuji podstatně levnější *stupňovitě spínanou kontaktní kompenzaci*.

- **Řízená chráněná kompenzace 6,3 kV**

Jednotlivé stupně budou tvořeny vyladěnými LC obvody, zamezujícími přetěžování kondenzátorů a odsávání nosného kmitočtu HDO z rozvodné sítě. Vřazená tlumivka rovněž omezí proudové rázy při spínání.

Ke spínání budou použity vakuové stykače, umožňující vysoký počet spínacích operací s jištěním kompenzačních stupňů pojistkami. Pro zvýšený stupeň ochrany se kondenzátory vybavují přetlakovými pojistkami a tlumivky teplotními čidly ve vinutí. Dosažení požadované hodnoty účinníku bude obstarávat mikroprocesorový regulátor vyhodnocující střední hodnotu účinníku. Přívod do kompenzačního rozvaděče bude realizován kabelem zaústěným do přírodního pole.

Tato volba přináší výhody v podobě:

- nízkých investičních nákladů – přibližně $15 \div 20$ % ceny plynule regulovatelných zařízení
- relativně malých ztrát – u kompenzace s hradíci tlumivkami cca $5,5 \div 7$ W / kvar
- nízkých nákladů na údržbu

S řešením však souvisí i určité nevýhody, které je nutno při návrhu respektovat, popř. minimalizovat:

- v důsledku skokové změny jalového výkonu může docházet ke krátkodobému překompenzování sítě způsobující změny napětí a nevyžádanou dodávkou kapacitního výkonu. Za každou takto dodanou kvarh je účtováno 0,4 Kč, není-li dohodnuto jinak.
- při spínání se mohou vyskytovat spínací přepětí ohrožující kompenzační zařízení a paralelně připojené spotřebiče
- kompenzační stupně je nutno vybavit rychlovybíjecím zařízením, v opačném případě je možné jejich opětovné zapnutí nejdříve po 5 minutách

5.1 Připojení kompenzačního zařízení

Kompenzační zařízení bude situováno v místě skříňové rozvodny R3.2, která zajišťuje napájení transformátorů pro pomocné pohony a osvětlení válcovny. Podružná skříňová rozvodna je umístěna v druhém patře třípodlažní budovy, napojení je provedeno kabely 4x6-AYKCY 3x240 mm² délky 50 m z pole č. 18 rozsáhlé dvousystémové rozvodny R2 (celkem 32 kobek) v horním podlaží. V přívodu je zařazen reaktor 1000 A, $u_k = 6$ %. Pro kompenzační rozvaděč bude navrhnut samostatný přívod z R2. Hodnoty napětí a proudů pro vyhodnocení účinníku a následnou automatickou regulaci budou snímány přes měřicí transformátory proudu a napětí. Rozvodnu R2 je možné napájet do kobek č. 2, 3, 4 a 30, 31. Údaje o odběru je tedy nutné získat ze dvou měřících míst a sečíst součtovým transformátorem proudu.

5.2 Výkony kompenzačních stupňů bez tlumivek

Pro optimální návrh kompenzace v celém rozmezí odebíraných výkonů je navrženo váhové spínání, přičemž počet a velikost jednotlivých stupňů je zvolen s ohledem na:

- požadovanou hodnotu vykompenzování
- celkový potřebný kompenzační výkon
- hospodárné spínání s minimálním počtem operací

Před vlastním návrhem je potřeba se zorientovat v základních vlastnostech a funkcích automatických regulátorů. Některé algoritmy totiž dokážou značně usnadnit samotný návrh kompenzace.

5.2.1 Parametry regulátoru ovlivňující návrh kompenzace

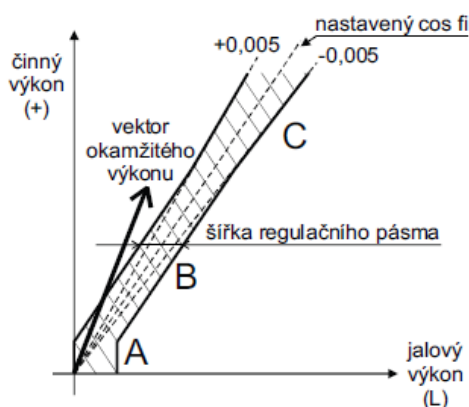
V následujícím textu jsou uvedeny funkce regulátoru jalového výkonu Novar 1406. Tento regulátor vyšel na základě analýzy trhu jako nejvýhodnější. Výhodou je především přijatelná cena, možnost nastavení pásma necitlivosti při velkých výkonech a vyhodnocení třífázového účinníku.

- **Požadovaný účinník**

Požadovaný účinník lze nastavit v rozsahu 0,8 ind. ÷ 0,8 kap. s krokovým nastavením 0,01. Pro přesnější nastavení lze zadávat přímo fázový úhel v rozsahu ± 10 stupňů.

- **Rozsah regulace**

Rozsah regulace stanovuje šířka regulačního pásma znázorněna na Obr. 5.2-1. Pro nízké (oblast A) a střední (B) zatížení odpovídá šířka regulačního pásma výkonu nejmenšího kapacitního stupně. Regulátor sleduje směrnici nastaveného účinníku s odchylkou poloviny výkonu nejmenšího regulačního stupně. Pro zatížení (C) lze šířku regulačního pásma rozšířit. Eliminujeme tak počet regulačních zásahů při vysokých zatíženích, kde by jinak docházelo ke zbytečně přesné regulaci. Šířku při vysokém zatížení lze nastavit až na hodnotu 0,04 s krokovým nastavením 0,005. Bude-li požadovaný účinník nastaven na hodnotu 0,95, pak bude v oblasti C považován za vykompenzovaný stav v rozsahu 0,93 až 0,97. Aby nedocházelo k nežádoucímu překompenzování, je regulační pásmo při nízkém zatížení algoritmem regulátoru upraveno.



Obr. 5.2-1 Šířka regulačního pásma

- **Rychlost regulace**

Rozlišuje se doba regulace v oblasti nedokompenzování a v oblasti překompenzování. Nastavená hodnota v rozsahu 5 sekund až 20 minut určuje četnost regulačních zásahů, jeli rozdíl okamžitého jalového výkonu v síti a optimální hodnoty (odpovídající požadovanému $\cos\varphi$) větší, než polovina výkonu nejmenšího kapacitního stupně.

- **Doba blokování znovuzapnutí**

Zajišťuje dostatečné vybití kondenzátorového stupně před opětovným zapnutím. Volí se v rozsahu 5 sekund až 20 minut.

[15]

5.2.2 Návrh nejmenšího kompenzačního stupně

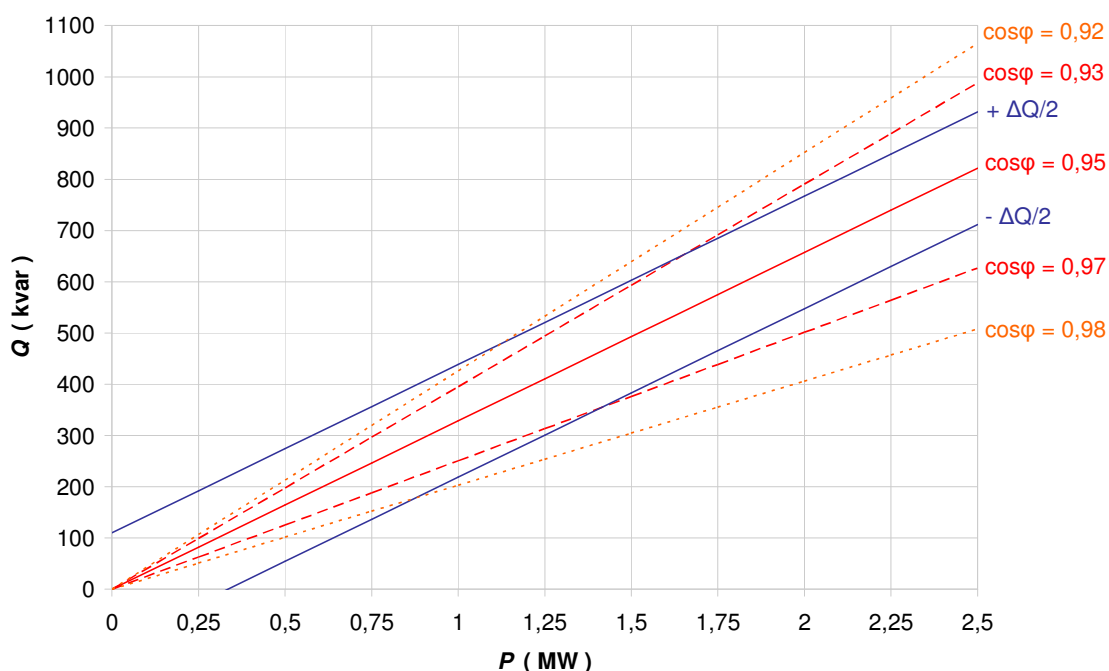
Z principu stupňovité kompenzace vyplývá, že není možné vykompenzovat hodnotu jalového výkonu, jehož velikost je menší než výkon nejmenšího kompenzačního stupně. Tato hodnota je právě míra nevykompenzování. Výkon nejmenšího stupně při váhovém spínání a nastaveném požadovaném účinníku vymezí deficit jalového výkonu, s kterým bude kompenzace pracovat (zároveň i rozsah $\cos\varphi$ příslušných odběrů) v závislosti na činném odběru P , jak je znázorněno na Obr. 5.2-2.

Při návrhu vycházím z Tab. 5.2-1 získané analýzou naměřených dat, kde je patrné, že nejčastěji se činný odběr nachází v oblasti $0,375 \div 1$ MW. S ohledem na tuto oblast volím nejmenší kompenzační stupeň tak, aby nedocházelo k častému provozu s $\cos\varphi < 0,92$.

Tab. 5.2-1 Údaje o odběru činného výkonu P v měřeném období

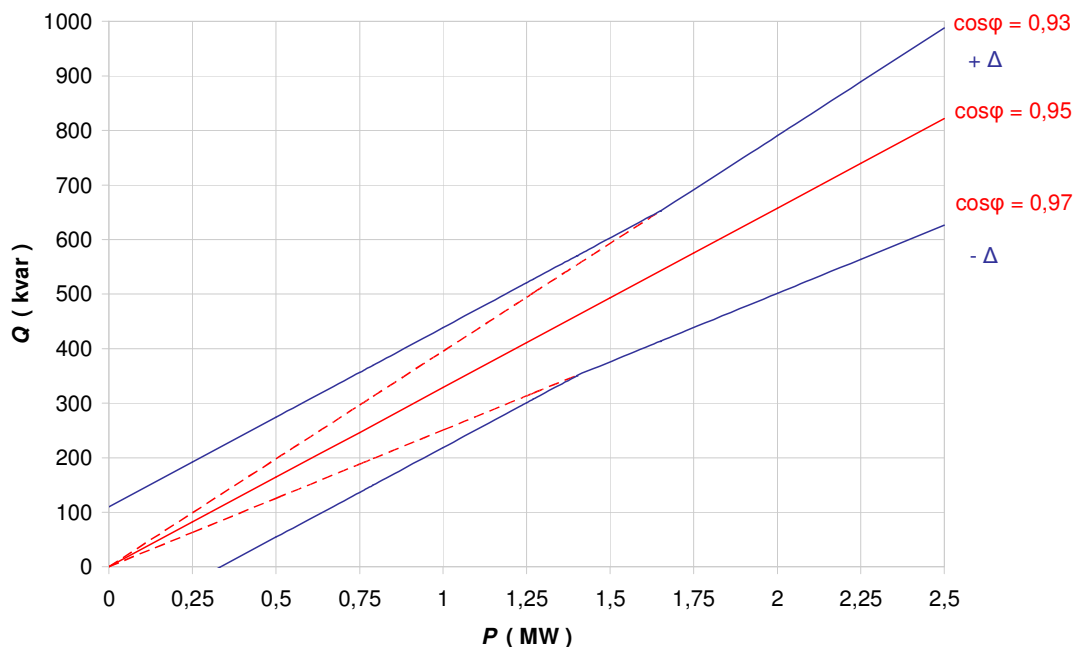
oblast P	četnost odběrů v oblasti P	oblast P	četnost odběrů v oblasti P
(MW)	(%)	(MW)	(%)
< 0,125	6,2	1 – 1,25	12,8
0,125 – 0,25	7,0	1,25 – 1,5	9,0
0,25 – 0,375	6,2	1,5 – 1,75	7,3
0,375 – 0,5	8,0	1,75 – 2	5,0
0,5 – 0,75	17,3	2 – 2,25	1,7
0,75 – 1	19,4	2,25 – 2,5	0,1

Jako vyhovující dle Obr. 5.2-2 vychází $\Delta Q = 220$ kvar. Je však nutno uvažovat zmenšení výkonu vlivem hradících tlumivek a následkem rozdílné jmenovité a skutečné napěťové hladiny kompenzačních kondenzátorů. Na základě uvedených okolností volím výkon kondenzátorové baterie 1. stupně 250 kvar.



Obr. 5.2-2 Šířka regulačního pásma $\Delta Q = 220$ kvar

Vhodným nastavením regulátoru lze zvětšit šířku regulačního pásma v oblasti vysokých výkonů, jak je uvedeno v kapitole 5.2.1. Dojde tak k omezení regulačních zásahů při vysokém zatížení. Výsledný stav pro $\Delta Q = 220$ kvar je na Obr. 5.2-3.



Obr. 5.2-3 Šířka regulačního pásma po úpravě regulátorem ($\Delta Q = 220$ kvar)

Výkon kondenzátorové baterie 1. stupně volím 250 kvar, jedná se o kompromis pro omezení četnosti spínání, který má za následek nižší účinník (cca $0,85 \div 0,9$) pro část odběrů s $P < 0,75$ MW. Spodní hranice činného odběru, kdy regulátor ještě pracuje, je 50 % výkonu prvního stupně. Poté se odpojí všechny výstupy (jedná se o méně než 5 % případů).

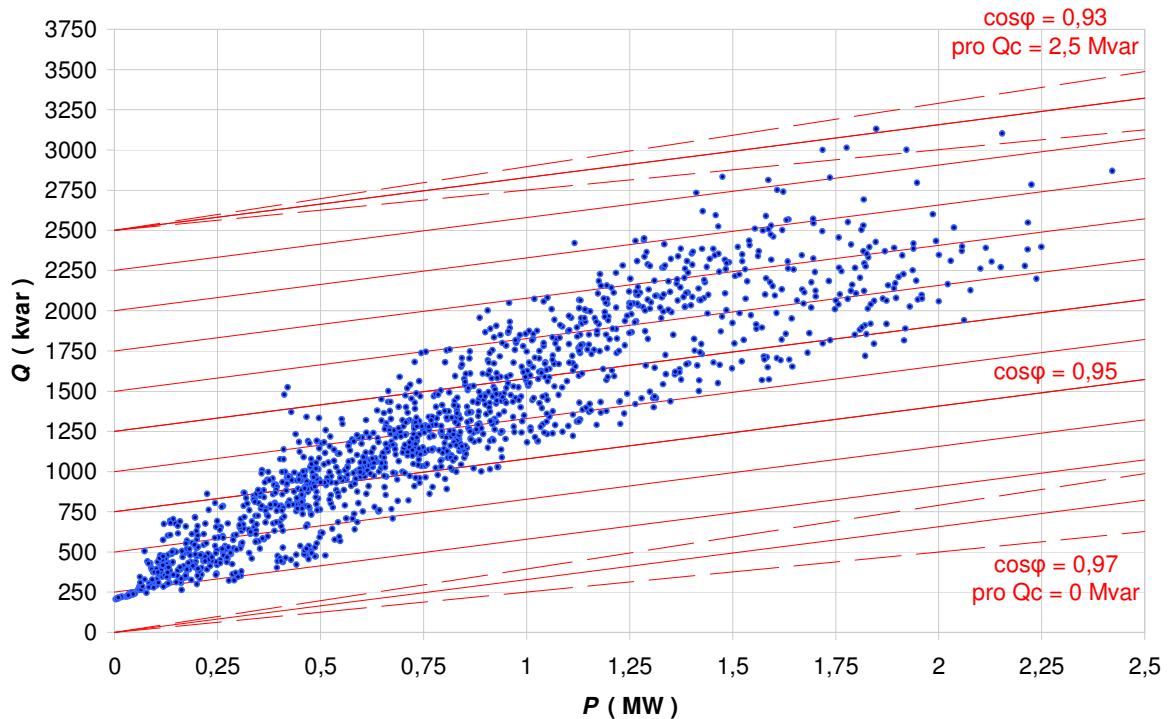
5.2.3 Celkový počet stupňů a jejich váhy

Pro stanovení výkonů kondenzátorů ostatních stupňů vycházím z Obr. 4.4-5 znázorňujícího úsek odběrů s největšími změnami zatížení a následující úvahy.

Výkony kondenzátorů ostatních stupňů volím jako násobky stupně prvního (váhově), tak aby byla pokryta celá oblast odebíraných výkonů s šířkou regulačního pásma odpovídající výkonu nejmenšího stupně. Zároveň je potřeba zajistit rezervu pro předřazení ochranných tlumivek. Výsledek řešení znázorňuje Obr. 5.2-4.

- 1. stupeň 250 kvar
- 2. stupeň 500 kvar
- 3. stupeň 750 kvar
- 4. stupeň 1000 kvar

Celkový instalovaný výkon (bez uvažování vlivu předřadných tlumivek) činí 2,5 Mvar.



Obr. 5.2-4 Připínání kompenzačních stupňů k zajištění požadovaného $\cos\phi$

Na Obr. 5.2-4 je funkce $Q = f(P)$ při váhovém spínání. Rovnoběžky odpovídají účinníku $\cos\phi = 0,95$ ($\tan\phi = 0,33$) pro určitou kombinaci sepnutých stupňů. Navrhnuté stupně umožňují vytvořit celkem 10 různých hodnot kompenzačního výkonu. Přerušovanými křivkami jsou vymezeny oblasti, ve kterých se účinník nachází v rozmezí $0,93 \div 0,97$, pro danou kombinaci kompenzačních stupňů (pro orientaci jen u $Q_c = 0$ a 2,5 Mvar). Modré body odpovídají odběrům, a protože se průběhy opakují, jsou z důvodu lepší přehlednosti vybrány data během 24 hodinového intervalu od 4.9.2011 7:00 do 5.9 7:00 hod.

Celkový výkon 2,5 Mvar splňuje potřebu kompenzačního výkonu s dostatečnou rezervou i s ohledem na předřazení ochranných tlumivek.



Obr. 5.2-5 Kompenzační kondenzátory vn

5.3 Návrh ochranných tlumivek a sestavení kompenzačních stupňů

Prostřednictvím ochranných tlumivek jsou jednotlivé stupně přeladěny do kmitočtového pásma, kde se nevyskytují charakteristické harmonické (5., 7., 11., 13.) a současně je zachován dostatečný odstup od frekvence signálu HDO, pro zabránění jeho odsávání ze sítě. Tlumivky navrhují tak, aby rezonanční frekvence byla mezi 3. a 5. harmonickou, prakticky 170 až 205 Hz. Účelem je, aby celková impedance měla induktivní charakter pro nejmenší výraznou harmonickou.

Celé území Těšínského Slezska spadá pod oblast s nosnou frekvencí HDO na úrovni 283,33 Hz. Proto volím naladění jednotlivých stupňů na kmitočet 204 Hz, odpovídající činiteli zacínování 6 %.

Vlivem předřazení ochranných tlumivek vzroste napětí na kondenzátorech na napětí U_C ^{*)}, přičemž za jmenovité napětí U_N dosazují vzhledem k výsledkům měření průměrnou hodnotu napájecího napětí 6,3 kV:

$$U_C = \frac{U_N}{1-p} = \frac{6,3}{1-0,06} = 6,7 \text{ kV}$$

⇒ S ohledem na naměřené odchylky napájecího napětí navrhují kondenzátorové jednotky se jmenovitým napětím $U_{CN} = 6,9 \text{ kV}$.

- **Parametry chráněné kompenzační sekce 1. stupně - $Q_{CN} = 250 \text{ kvar}$:**

Výkon kondenzátorové baterie přepočtený na pracovní napětí 6,7 kV:

$$Q_C = Q_{CN} \cdot \left(\frac{U_C}{U_{CN}} \right)^2 = 250 \cdot \left(\frac{6,7}{6,9} \right)^2 = 235,7 \text{ kvar}$$

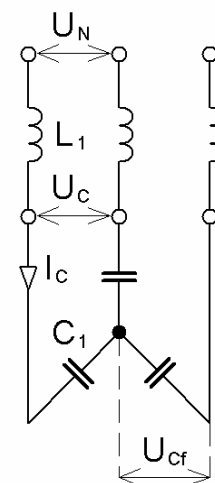
Reaktance a kapacita kondenzátoru pro kompenzaci 1. harmonické:

$$X_{C1} = \frac{U_{CN}^2}{Q_{CN}} = \frac{6900^2}{250 \cdot 10^3} = 190,4 \text{ } \Omega$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega \cdot X_{C1}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 190,4} = 16,7 \text{ } \mu\text{F}$$

Skutečný proud kondenzátorem:

$$I_C = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U_C} = \frac{235,7 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6700} = 20,3 \text{ A}$$



Obr. 5.3-1 Kompenzační sekce

*) Navrhovány jsou třífázové kompenzační jednotky ve spojení do hvězdy. Výpočet je tedy lépe vztahovat k fázovému napětí. Sdružené hodnoty napětí při výpočtu jsou uvažovány s ohledem na údaje výrobce.

Reaktance a indukčnost ochranné tlumivky pro činitel zatlumení 6 %:

$$X_{L1} = \frac{p}{100} \cdot X_{C1} = \frac{6}{100} \cdot 190,4 = 11,42 \quad \Omega$$

$$L_1 = \frac{X_{L1}}{\omega} = \frac{11,42}{2\pi \cdot 50} = 36,4 \quad \text{mH}$$

Kontrola rezonanční frekvence:

$$f_r = f_1 \cdot \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{190,4}{11,42}} = 204 \quad \text{Hz}$$

Výsledný třífázový kompenzační výkon LC obvodu prvního stupně:

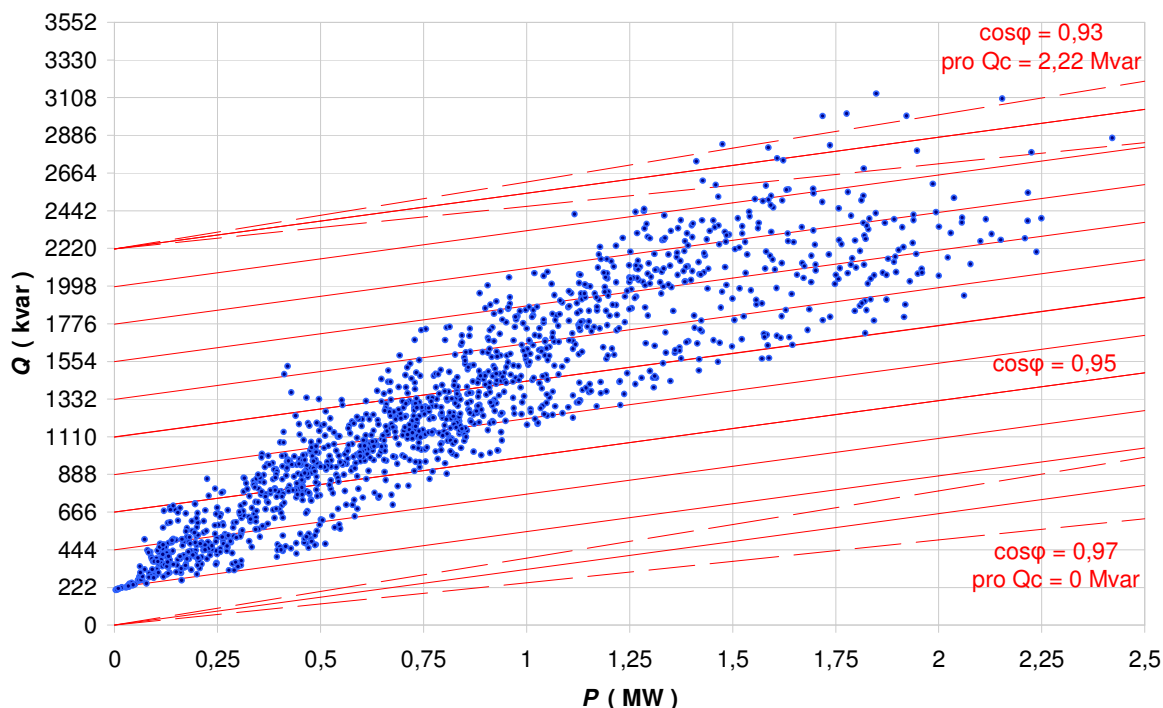
$$Q_{LC} = 3 \cdot \frac{U_f^2}{X_{LC1}} = \frac{U_N^2}{X_{C1} \cdot \left(1 - \frac{p}{100}\right)} = \left(\frac{U_N}{U_{CN}}\right)^2 \cdot \frac{Q_{CN}}{1 - \frac{p}{100}} = \left(\frac{6,3}{6,9}\right)^2 \cdot \frac{250}{1 - \frac{6}{100}} = 221,7 \quad \text{kvar}$$

Užitím výše uvedených vztahů jsou vypočteny parametry pro ostatní stupně. Výsledky jsou uvedeny v tab. 5.3-1.

Tab. 5.3-1 Základní údaje spínaných kompenzačních sekcí

Parametry kompenzačních stupňů			1. stupeň	2. stupeň	3. stupeň	4. stupeň
Jmenovitý výkon kondenzátorové baterie	Q_{CN}	kvar	250	500	750	1000
Výkon Q_{CN} přepočtený na skutečné pracovní napětí 6,7 kV	Q_C	kvar	235,7	471,7	707,6	943,5
Kapacitní reaktance kondenzátoru	X_C	Ω	190,4	95,2	63,5	47,6
Kapacita kondenzátorové baterie (Y)	C	μF	3 x 16,7	3 x 33,4	3 x 50,1	3 x 66,9
Skutečný proud kondenzátorem	I_C	A	20,3	40,6	60,9	81,3
Činitel zatlumení	p	%	6	6	6	6
Rezonanční kmitočet	f_r	Hz	204	204	204	204
Induktivní reaktance tlumivky	X_L	Ω	11,42	5,71	3,81	2,86
Indukčnost tlumivky	L	mH	3 x 36,4	3 x 18,2	3 x 12,1	3 x 9,1
Užitečný kompenzační výkon (po předřazení tlumivky)	Q_{LC}	kvar	221,7	443,4	665,1	886,9

Celkový kapacitní výkon se po předřazení ochranných tlumivek sníží z 2,5 Mvar na hodnotu 2,22 Mvar. Tento výkon je schopen zajistit i při nejvyšším zatížení účinník $\cos\varphi > 0,93$ pro většinu hodnot, jak znázorňuje Obr. 5.3-2. K dispozici je i dostatečná rezerva pro stárnutí kondenzátorů.



Obr. 5.3-2 Pokrytí odběrů po předřazení tlumivek

5.4 Zhodnocení návrhu kompenzačních stupňů

Při návrhu kompenzačních stupňů jsem se omezil na kompenzaci odběrů s jalovým výkonem vyšším, než 222 kvar (výkon 1. stupně). Zcela bez kompenzace tak zůstane přibližně 5 % odběrů s malým zatížením. Jedná se především o oblast vynesenu v grafu Obr. 4.4-6. Výhodou je, že značná část těchto hodnot vykazuje poměrně dobrý účinník i bez kompenzace (viz. Obr. 4.4-8).

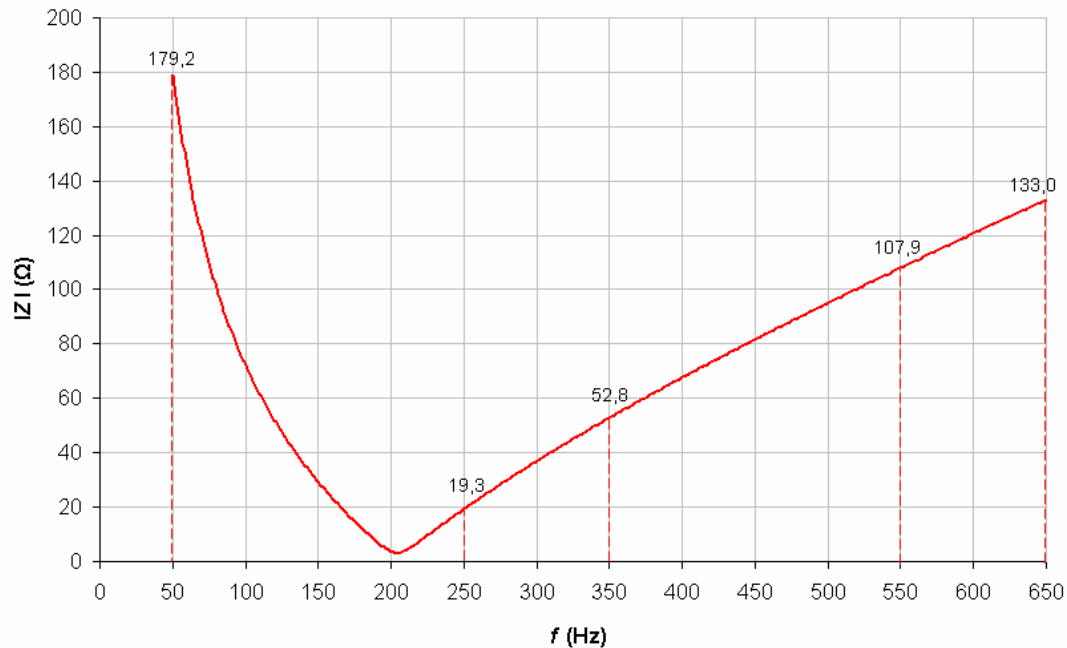
Pokrytí hodnot při nejvyšších zatíženích je téměř 100 %. Pokud by došlo vlivem stárnutí kondenzátorů ke ztrátě 15 % výkonu (kondenzátory se považují za vadné, pokud jejich úbytek kapacity je vyšší než 20 % jmenovité hodnoty), pak by se mimo oblast kompenzace ($\cos\varphi < 0,93$) nacházelo přibližně 1 % odběrů. S ohledem na nerovnoměrné zatížení kompenzačních stupňů se nepředpokládá jejich rovnoměrné stárnutí. Pokud by nastalo rozšíření výroby, je zapotřebí doplnit kompenzační zařízení o další stupeň, popřípadě navýšit výkon některého stupně na základě nového měření.

Zhoršenou hodnotu účinníku lze očekávat u části odběrů s $P < 0,75$ MW, kde malé změny deficitu jalového výkonu představují významnější změny $\cos\varphi$, než je tomu u větších zatížení. Přibližně 12 % odběrů z této oblasti tak může vykazovat $\cos\varphi < 0,9$. Tento stav by bylo možné zmírnit jen volbou menších kompenzačních stupňů a tedy větším počtem sekcí a častější regulací.

5.5 Přetížení kondenzátorů

Standardní kondenzátory vn jsou konstruovány pro 30 % přetížení. Uvažováno je kombinované působení harmonických, tolerance napájecího napětí a kapacitní tolerance.

Pro zohlednění přetížení harmonickými je pomocí EMTP-ATP vykreslena rezonanční křivka pro první stupeň kompenzace. Ostatní stupně tvoří jeho celistvé násobky, poměrné hodnoty přetížení se tedy nebudou lišit, proto je vyšetření jednoho stupně postačující.



Obr. 5.5-1 Rezonanční křivka prvního stupně kompenzace

Harmonické proudy kondenzátorem pro naměřené hodnoty harmonických napětí

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_{50}} = \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 179,2} = 20,3 \text{ A} & I_{11} &= \frac{u_{11}}{100} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_{550}} = \frac{0,6}{100} \cdot \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 107,9} = 0,2 \text{ A} \\
 I_5 &= \frac{u_5}{100} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_{250}} = \frac{0,8}{100} \cdot \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 19,3} = 1,51 \text{ A} & I_{13} &= \frac{u_{13}}{100} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_{650}} = \frac{0,5}{100} \cdot \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 133} = 0,14 \text{ A} \\
 I_7 &= \frac{u_7}{100} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_{250}} = \frac{0,7}{100} \cdot \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 52,8} = 0,48 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Poměr efektivní hodnoty zahrnující harmonické k efektivní hodnotě základní harmonické:

$$\frac{I_{rms}}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum I_h^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{20,3^2 + 1,51^2 + 0,48^2 + 0,2^2 + 0,14^2}}{20,3} = 1,003 \text{ , odpovídá } THDi = 8 \%$$

Přetížení vlivem harmonických je za současného stavu zanedbatelné.

Celkové možné přetížení kondenzátorů s ohledem na vliv harmonických c_h , toleranci napájecího napětí c_u a toleranci kapacity c_c je za současného provozu:

$$I_p = c_h \cdot c_u \cdot c_c \cdot I_N = 1 \cdot 1,07 \cdot 1,1 \cdot I_N = 1,18 \cdot I_N$$

Tolerance napájecího napětí je $\pm 10\%$, kondenzátory jsou však pro zvýšenou spolehlivost dimenzovány na jmenovité napětí, které je o 3 % vyšší, než skutečné pracovní napětí. Tolerance kapacity činí $-5/+10\%$.

Pokud by došlo ke krajnímu zhoršení harmonických napětí (dané ČSN61000-2-4, 2. třída elektromagnetického prostředí), pak by přetížení mohlo dosahovat $I_p = 1,37 \cdot I_N$. Tento stav není předpokládán, proto jsou standardní kondenzátory za daných podmínek plně vyhovující.

Tab. 5.5-1 Nárůst efektivní a špičkové hodnoty proudu vzhledem k THDi

THDi	0 %	33 %	39 %	44 %
Špičková hodnota proudu	100 %	133 %	168 %	204 %
Efektivní hodnota proudu	100 %	105 %	108 %	110 %

5.6 Dimenzování přívodů, spínacích a jisticích přístrojů

Krátkodobě je možné kondenzátory přetížít s větší hodnotou než 1,3. Obecně se přívodní silové vodiče, spínací, ochranná a připojovací zařízení navrhují pro maximální proud, který odpovídá nejméně 1,43 násobku jmenovitého proudu.

Podle ČSN 33 3080 (kompenzace induktivního výkonu statickými kondenzátory) se jednotlivé kondenzátory, skupiny kondenzátorů, nebo celé kondenzátorové baterie a jejich přívodní vedení jistí podle všeobecně platných zásad o jištění spotřebičů. Norma nestanovuje, zda má být jištění na začátku přívodu, nebo až v rozvaděči.

V přívodním poli rozvaděče bude odpojovač pro zajištění bezpečné obsluhy, přívodní kabel bude vypínán a jištěn v hlavní rozvodně R2. Spínání kompenzačních stupňů bude realizováno vakuovými stykači s jištěním pomalými pojistkami.

5.6.1 Hlavní přívodní kabel rozvaděče

Skříňová rozvodna R3.2, kde má být kompenzační rozvaděč umístěn je napájena přívodem se zařazeným omezujícím reaktorem. Pro kompenzační rozvaděč navrhují samostatný přívod z některého volného pole rozvodny R2. Proti přetížení, zemním poruchám, nesymetrii bude rozvaděč jištěn ochranou s vypínačem. Proti zkratu budou předřazeny pojistky.

Jmenovitý proud:

$$I_N = \frac{Q_{CN}}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{2,217 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6300} = 203,2 \text{ A}$$

Proud respektující přetížení:	$I_{\max} = 1,5 \cdot I_N = 1,5 \cdot 203,2 = 305 \text{ A}$
Součinitel teploty okolí 30 °:	$k_1 = 1$ (izolace PVC)
Součinitel respektující uložení kabelu:	$k_2 = 0,75$ (perforovaná lávka – 6 kabelů - dle tabulek [8])
Jmenovitá zatížitelnost kabelu:	$I_Z > \frac{I_{\max}}{k_1 \cdot k_2} = \frac{305}{1 \cdot 0,75} = 407 \text{ A}$
Počáteční rázový zkratový proud:	$I_k'' = 45 \text{ kA}$
Doba vypnutí:	$t_{\text{vyp}} = 0,02 \text{ s}$ (dle tabulek [8])
Ekvivalentní oteplovací proud:	$I_{ke} = k_e \cdot I_k'' = 1,35 \cdot 45 = 60,75 \text{ kA}$
Minimální průřez kabelu:	$S_{\min} = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_{\text{vyp}}}}{K} = \frac{60,75 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{0,02}}{115} \geq 75 \text{ mm}^2$
\Rightarrow <u>kabel 6-CYKY 3x240 mm²</u> :	$R_k = 0,075 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$; $X_k = 0,088 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$, $l = 50 \text{ m}$, $I_{dov} = 423 \text{ A}$ (na vzduchu) [9]

5.6.2 Spínání kompenzačních sekcí

Z hlediska spínání kondenzátorových baterií je nutné, aby při výběru jističích a spínacích přístrojů byly zohledněny nejen jmenovité parametry provozu, ale především přechodné jevy v podobě maximálního připojovacího proudu, jeho kmitočtu a přepětí při vypínání.

- Proudové rázy**

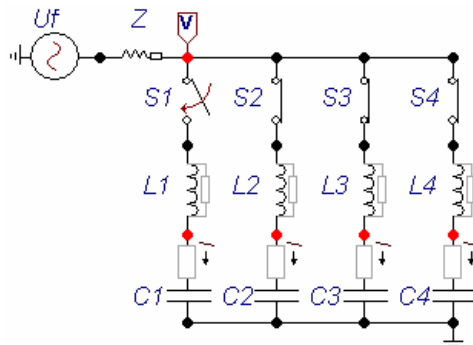
Připínáním vybitého kondenzátoru k síti vzniká proudový přechodný jev s tlumeným kmitáním závislý na napětí sítě, okamžiku sepnutí, kapacitě kondenzátoru a přírodní impedanci. Amplituda nabíjecího proudu je při připnutí prvního kondenzátoru k síti v nejnepříznivějším případě [6]

$$I_m = \sqrt{2} \cdot \frac{U_f}{\sqrt{X_L \cdot X_C}} = \sqrt{2} \cdot I_C \cdot \sqrt{\frac{S_k}{Q_C}} \quad (5.1)$$

- , kde
- X_L induktivní reaktance napájecí sítě
 - X_C kapacitní reaktance kondenzátoru
 - I_C jmenovitý proud kondenzátoru (ef. hodnota)
 - S_k trojfázový počáteční rázový zkratový výkon napájecí sítě
 - Q_C jmenovitý výkon připínaného kondenzátoru

V případě připínání dalších kondenzátorů již není přechodný děj omezen impedancí sítě, ale jen předřadnými ochrannými tlumivkami.

K posouzení proudových rázů při spínání kondenzátorů je využito simulačního programu elektromagnetických přechodných dějů EMTP - ATP. Zjednodušené schéma pro řešení je na Obr. 5.6-1. Parametry obvodu jsou dle vypočtené tabulky Tab. 5.3-1. Činný odpor je zvolený tak, aby ztráty odpovídaly 0,6 % jalového výkonu příslušného stupně.

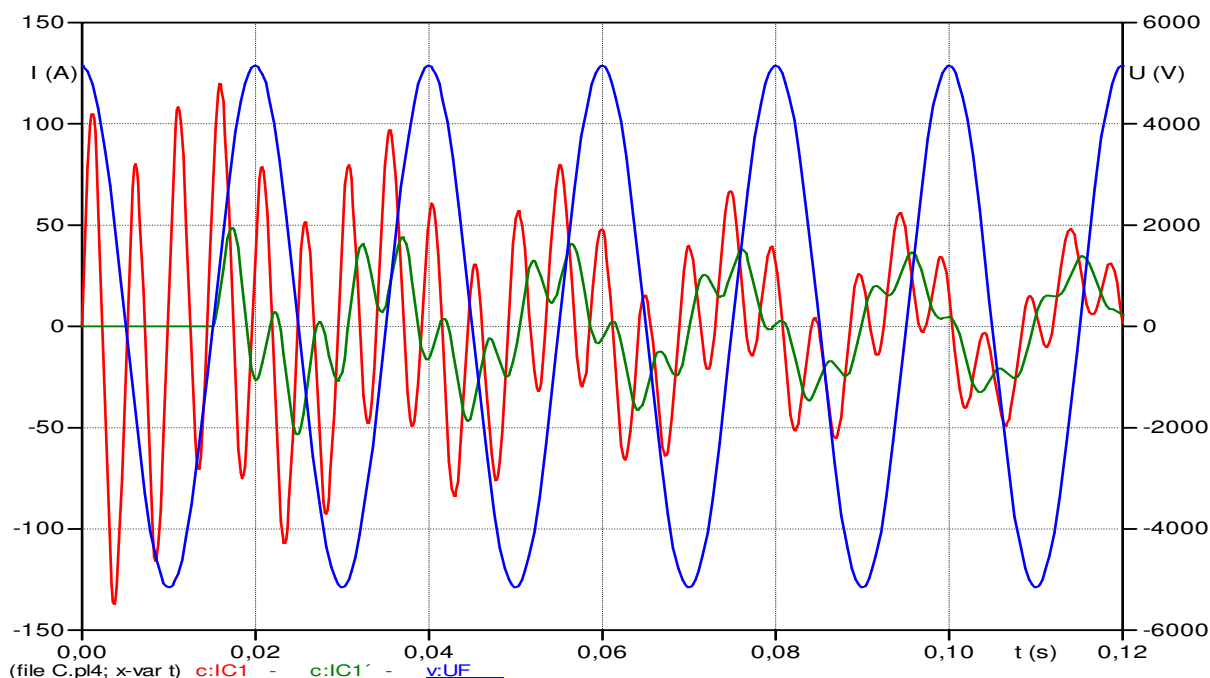


Obr. 5.6-1 Jednofázové schéma čtyř-stupňové kompenzace v EMTP-ATP

U kontaktního spínání je základním předpokladem vybitý kondenzátor, jinak hrozí značné přepětí a rázy ohrožující samotné kondenzátory i paralelně připojené zařízení. Hranice zůstatkového napětí, při které je možné kondenzátor opětovně připojit je 10% jmenovitého napětí kondenzátoru. Simulací jsou vyšetřeny následující stavy:

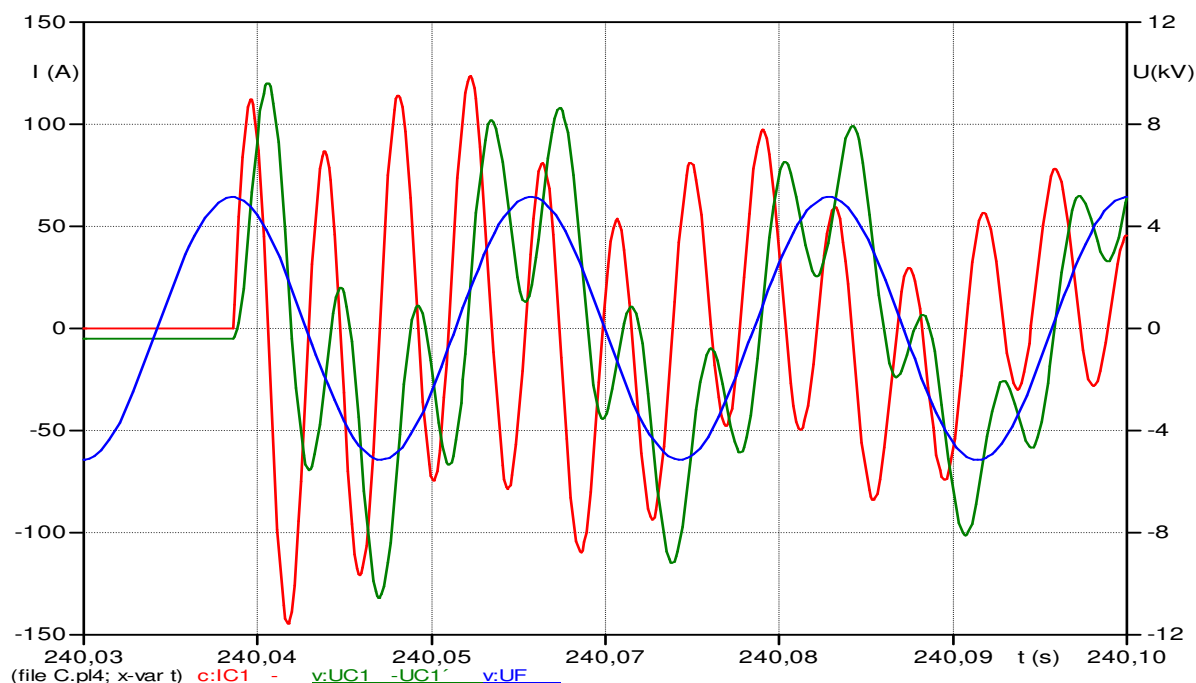
- připojení kondenzátoru k síti v maximu napětí
- připojení kondenzátoru k síti při průchodu napětí nulou

Poměry pro 1. stupeň kompenzace při zcela vybitém kondenzátoru jsou uvedeny na Obr. 5.6-2.



Obr. 5.6-2 Připnutí 1. stupně v max. napětí (IC1) a při průchodu napětí nulou (IC1')

Jednotlivé stupně jsou navrženy jako celistvé násobky prvního stupně. Poměrné hodnoty proudových rázů, kmitočet připojovacího proudu a odeznění přechodného jevu jsou ve všech případech totožné. Pro objektivní posouzení je vyšetřeno i spínání kondenzátoru se zbytkovým napětím odpovídajícím 10 % jmenovitého napětí kondenzátoru na Obr. 5.6-3. Zároveň je možné pozorovat přepětí, ke kterým může u kondenzátorů docházet. Získané výsledky uvádím v Tab. 5.6-1



Obr. 5.6-3 Připnutí 1. stupně v max. napětí, při částečně vybitém kondenzátoru

IC1... nabíjecí proud

UC1.....napětí na kondenzátoru

UFnapětí zdroje

Zatímco při spínání v nule napětí zdroje dosahuje proudový ráz 1,85-ti násobku ustálené amplitudy, tak při spínání v maximu napětí se jedná až o 4,8-mi násobek. Uvážíme-li spínání s přípustným zůstatkovým napětím, může proudový ráz dosahovat 5-ti násobku. Kmitočet připojovacího proudu odpovídá vlastnímu kmitočtu obvodu 204 Hz. Spínací přístroje jsou běžně konstruovány na kmitočet 2,5 kHz s max. vrcholovým proudem v řádech jednotek kiloampérů.

Tab. 5.6-1 Max. a ustálené hodnoty (amplitudy) při spínání kompenzačních stupňů, odečtené v EMTP

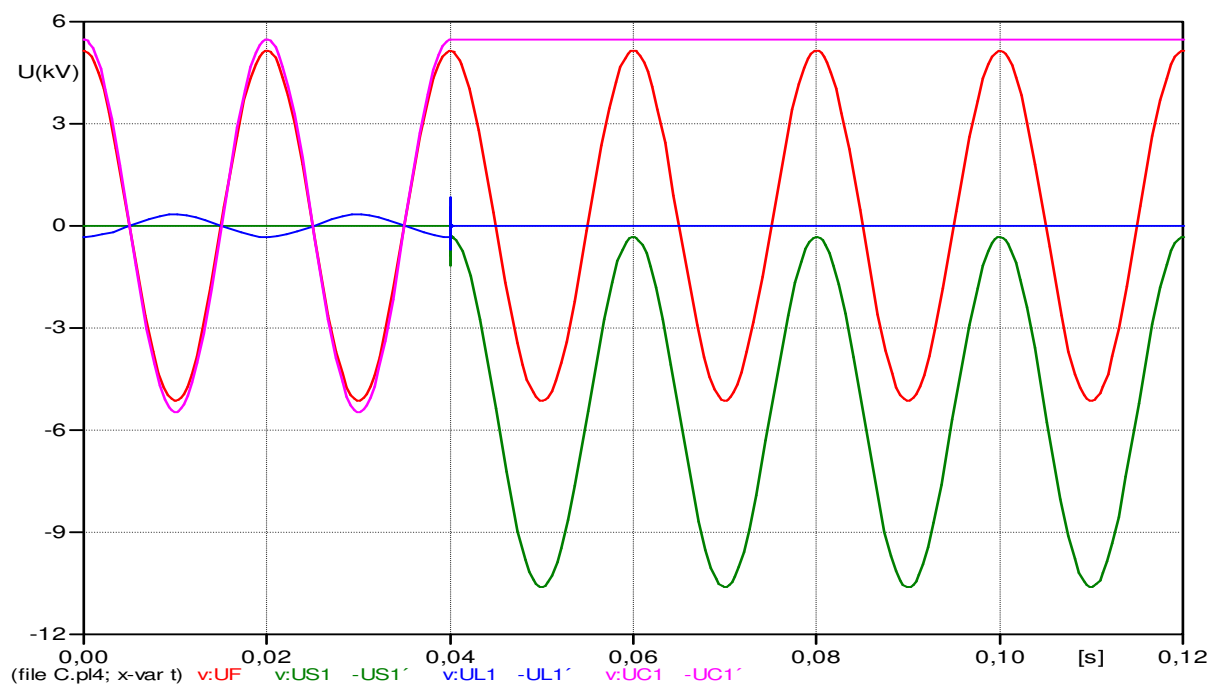
Simulovaný stav	I_{C1m}	I_{C2m}	I_{C3m}	I_{C4m}
	(A)	(A)	(A)	(A)
zapnutí při průchodu napětí nulou (vybitý kondenzátor)	53	107	160	214
zapnutí v maximu napětí (vybitý kondenzátor)	137	274	411	548
zapnutí v maximu napětí (10% zůstatek jmenovitého napětí)	144	287	427	578
ustálený stav	28,7	57,4	86,1	115

- **Přepětí při vypínání**

Po odpojení kompenzačního stupně od sítě, zůstává napětí kondenzátoru (UC1) na maximální hodnotě napětí zdroje, navíc zvýšené o 6 % vlivem předřazených tlumivek. Vlivem oscilací může toto napětí dosahovat i vyšších hodnot. Napětí na kondenzátorech klesá s časovou konstantou odpovídající jeho kapacitě a velikosti vybíjecích odporů. Kondenzátory jsou vybaveny vybíjecími odpory, které snižují napětí na 75 V do 10 minut. Tzn., že v prvních okamžicích je pokles napětí zanedbatelný.

Napětí druhého pólu kontaktu kmitá s kmitočtem sítě. Výsledné zotavené napětí na vypínači (US1), může dosahovat více, než 2 - násobku napětí zdroje (UF). To působí na napěťové namáhání stykačů. Odlehčení je možné zajistit přidáním rychlovybíjecím zařízením.

Pro zabránění opakovaných průrazů je nutno zvolit vypínače se strmě rostoucí studenou charakteristikou. Požadavku nejlépe vyhovují vakuové vypínače, které zároveň splňují nutnou podmínku spínání ve stykačovém režimu.



Obr. 5.6-4 Zotavené napětí na kontaktech stykačů

UF.....fázové napětí zdroje

US1..... napětí na vypínači

UL1napětí na tlumivce

UC1..... napětí na kondenzátoru

Nejhorší případ přepětí, které může v obvodu nastat je při vypínání zkratového proudu pojistkou (vypínáme značný proud tlumivky). Zatímco konstrukce vakuových stykačů zabráňuje při vypínání trhání proudu mimo oblast průchodu nulou, tak vypínání pojistkou má přesně opačný efekt a vzniklé oscilace napětí nabíjí kondenzátor. Tento jev je nutno uvážit při volbě izolační hladiny jistících prvků.

5.7 Komponenty kompenzačního zařízení

5.7.1 Hrazený kompenzační rozvaděč VN

Komponenty budou instalovány do kompenzačního rozvaděče jmenovitého napětí 6,3 kV, složeného z jednoho pole přívodního a čtyř polí kompenzačních, tvořených LC obvody naladěnými na kmitočet 204 Hz.

V přívodním poli bude odpojovač, jističí, signalizační a ovládací obvody pro spínání jednotlivých stupňů vakuovými stykači s předřazenými výkonovými pojistkami. Omezení proudových rázů bude provedeno ochrannými hradíci tlumivkami. Rozvaděč je vhodné dovybavit i poruchovým systémem hlídající tlak kondenzátorů, teplotu tlumivek, teplotu vnitřního prostoru rozvaděče a detekci stavu pojistek.

Tab. 5.7-1 Technické údaje rozvaděče

Napěťová soustava	3 PE AC 50 Hz 6,3 kV/IT
Instalovaný výkon	250 + 500 + 750 + 1000 kvar
Kompenzační výkon	222 + 443 + 665 + 887 kvar
Jmenovitý proud	305 A
Jištění	pojistky CEF 12 kV
Hradíci tlumivky (činitel zatlumení)	$p = 6 \%$ ($f_r = 204 \text{ Hz}$)
Kondenzátory	typu CPEFS 6,9 kV
Teplota prostředí	vnitřní provedení -10°C až 40°C (prům. teplota za 24 hod. max $+35^\circ\text{C}$)
stupeň krytí IP	40



Obr. 5.7-1 Kompenzační rozvaděč vn

5.7.2 Hlavní vypínač a jištění rozvaděče

Ke spínání a jištění celého rozvaděče a přívodního kabelu bude využito některé z volných kobek rozvodny R2. Z důvodu vysokého zkratového proudu rozvodny $I_k'' = 45 \text{ kA}$ a poměrně nízkého jmenovitého proudu kompenzace by vypínač odpovídající zkratové odolnosti byl značně předimenzovaný a drahý. Proto budou vypínači předřazeny pojistky. Zařízení za pojistkami stačí dimenzovat na proud I_{pm} , který pojistka propustí.

Pro viditelné odpojení vývodu může být využito stávajících přípojnicových odpojovačů $I_N = 2000 \text{ A}$, kterými jsou rezervní kobky vybaveny.

Navrhovány jsou pojistky s pomalou vypínací charakteristikou typu CMF od ABB se jmenovitými parametry: $I_N = 315 \text{ A}$, $U_N = 7,2 \text{ kV}$, $I_k'' = 50 \text{ kA}$, $I_{pm} = 30 \text{ kA}$.

Na základě analýzy trhu je vybrán vakuový vypínač Evolis 7,2 kV od Schneiderr-electric se jmenovitým proudem 630 A a jmenovitým vypínacím zkratovým proudem $I_k'' = 31,5 \text{ kA}$.

Ochranu před případným zemním spojením, podpětí, přepětí, nesymetrii bude obstarávat ochrana Sepam S41 od Schneiderr-electric. Tato ochrana rovněž umožňuje měření výkonů, energie, diagnostiku sítě a komunikaci (přenos záznamu poruch, dálkové řídicí povely, odečet měření, dálkovou parametrizaci). Data budou snímána z měřících transformátorů proudů a napětí s třídou přesnosti 0,5.

5.7.3 Jištění kompenzačních stupňů

K jištění kompenzačních stupňů před zkraty se používají pojistky. Navrhovány jsou pojistky instalované do pojistkové nadstavby vakuových stykačů.

Výběr pojistek je proveden na základě simulovaného přechodného děje v EMTP-ATP. Analýzou bylo zjištěno, že pojistky musí v případě předřazené tlumivky (6%) vydržet zapínací proud odpovídající přibližně 5 - ti násobku jmenovitého proudu kondenzátoru po dobu alespoň 0,1 sekundy. Tento údaj je porovnán s vypínacími charakteristikami pojistek CEF od ABB. Rovněž je respektováno možné přetížení odpovídající $1,5 I_N$.

Jmenovité napětí pojistek se volí o stupeň vyšší, než je jmenovité napětí kondenzátorové baterie. Při vypínání poruchových stavů hrozí oscilace a mohlo by dojít k opětovným průrazům. Navrhovány jsou pojistky se jmenovitým napětím 12 kV. Jak již bylo zmíněno, budou použity pojistky typu CEF od ABB v kombinaci s vakuovými stykači V-Contact 7,2 kV.

Tab. 5.7-2 Pojistkové tavné vložky CEF (ABB) vn dle mezinárodního standardu IEC 60 282-1

Jmenovité napětí	Jmenovitý proud	max. zkratový proud	minimální vypínací proud	výkonové ztráty při I_N	délka	průměr
U_N	I_N	I_K	I_{min}	P_N	e	d
kV	A	kA	A	W	mm	mm
12	16	63	55	32	292	53
	20		83	38		
	25		77	47		
	31,5		100	41	292	65
	40		105	52		
	50		190	70		
	63		190	78		
	80		250	82		
	100		275	84		
	125		375	125	292	87
	160		480	170	422	87

Pro jištění kompenzačních stupňů jsou vybrány pojistky 31,5; 63; 100; 125 A

5.7.4 Vakuové stykače

Dynamickému spínání kapacitních proudů vyhovují nejlépe vakuové stykače odpovídající mezinárodnímu standardu IEC60470.

Sériovou výrobou stykačů pro jmenovité napětí 7,2 kV se zabývá řada firem. V závislosti na zvoleném výrobcí jsou k dostání stykače se jmenovitými proudy 160 – 200 – 360 – 400 – 450 A. Ke spínání kapacit jsou však tyto hodnoty redukovány přibližně na 60%.

Mechanická životnost stykačů určených k častému spínání, tzn. systém s elektrickou západkou, se pohybuje od 1 mil. operačních cyklů – V-Contact VSC (ABB) až po 3 mil. operací - např. stykače 3TL61 (Siemens). Elektrickou životnost stykače udávají výrobci pro spínací kategorie AC3 – AC4 a dosahuje 300 000 operačních cyklů a AC1 až 1 mil. cyklů. Dle konzultace s výrobcí kompenzačních zařízení dochází k první opravě stykačů cca po 250 000 cyklech.

Na základě doporučení dodavatelů volím vakuové stykače V-Contact 7,2 kV/400A od ABB v pevném provedení.

Uvážíme-li, že spínací prvky stačí dimenzovat na trvalý proud odpovídající 1,5 násobku jmenovitého proudu, jak je uvedeno v kap. 5.6, pak budou především stykače prvních dvou stupňů značně předimenzovány. S ohledem na častější spínání těchto stupňů, zajistíme zvýšenou elektrickou životnost zhášedel.

5.7.5 Výkonové kondenzátory

Jeden z předních výrobců výkonových kondenzátorů v České republice je společnost ZEZ SILKO, s.r.o., která rovněž dodává i kompletní vybavení kompenzačních rozvaděčů.

Pro realizaci jsou vybrány třífázové jednotky v plně izolovaných nádobách zapojené do hvězdy. Kondenzátory mají vestavěné vnitřní vybíjecí odpory snižující napětí na 75 V do 10 minut. To je z hlediska dynamického provozu nedostatečné. Proto je nutné každý kondenzátor dovybavit rychlovybíjecím zařízením. V Tab. 5.7-3 jsou uvedeny primární výrobní údaje kondenzátorů. Doplňujícím požadavkem je vybavení vnitřními tavnými pojistkami svítek "WF".

Tab. 5.7-3 Jmenovité parametry kompenzačních kondenzátorů

Typ	Napětí	Výkon	Kapacita	Proud
	U_N	Q_N	C_N	I_N
	(kV)	(kvar)	(μF)	(A)
CPEFS 23-6,9/250/WF	6,9	250	3 x 16,7	20,9
CPEFS 23-6,9/500/WF		500	3 x 33,4	41,8
CPEFS 23-6,9/750/WF		750	3 x 50,1	62,8
CPEFS 23-6,9/1000/WF		1000	3 x 66,9	83,7

5.7.6 Ochranné hradící tlumivky

Tlumivky patří k nejdražším prvkům kompenzačního zařízení. Jelikož se nejedná o sériově vyráběné zboží, je nutno tlumivky vyrobit na zakázku. U nás se výrobou zabývá firma ESH&F Praha, jejíž tlumivky bývají dodavateli kompenzačních zařízení často používány.

Tlumivky budou konstruovány pro kondenzátory se jmenovitým napětím 6900 V v síti 6300 V, 50 Hz na rezonanční kmitočet 204 Hz. Provedení bude s železným jádrem, tepelnou izolací třídy F a tolerancí indukčnosti -1/+3 %. Návrh magnetického obvodu a způsob vinutí tlumivek musí zaručovat přetížitelnost při zachování linearitu tlumivky alespoň do 1,5 I_N . Tlumivky je potřeba dovybavit tepelnou ochranou.

Tab. 5.7-4 Výchozí údaje pro hradící tlumivky

Typ tlumivky	Výkon kondenz. baterie pro 6,7 kV	Výkon tlumivky	Kompenzační výkon	Indukčnost tlumivky	Jmenovitý trvalý proud	Nárazový proud
	Q_C	Q_L	Q_{LC}	L_N	I_N	i_{pmax}
	(kvar)	(kvar)	(kvar)	(mH)	(A)	(A)
250-204/6900/6300	235,9	14,2	221,7	3 x 36,4	20,3	144
500-204/6900/6300	471,7	28,3	443,4	3 x 18,2	40,6	287
750-204/6900/6300	707,6	42,5	665,1	3 x 12,1	60,9	427
1000-204/6900/6300	943,5	56,6	886,9	3 x 9,1	81,3	578

5.7.7 Rychlovybíjecí zařízení

Nejsou-li kompenzační stupně vybaveny rychlovybíjecím zařízením, pak je možné jejich opětovné sepnutí nejdříve po 5 minutách, kdy je jisté, že napětí pokleslo vlivem vnitřních vybíjecích odporů pod 10 % U_{fc} . S ohledem na dynamický provoz je požadováno vybíjecí zařízení snižující napětí na kondenzátoru během několika sekund. Zároveň tak dojde k odlehčení od napěťového namáhání vakuových stykačů.

Jako vybíjecího zařízení bude použito dvou vybíjecích tlumivek v zapojení “V” připojených přímo na svorky každé kondenzátorové baterie. K realizaci se používá 2 - pólově izolovaných transformátorů napětí, bez sekundárního vinutí, zajišťujících dobu vybíjení do 10 sekund.

Četnost spínání je nutné přizpůsobit, tak aby nedošlo k přehřátí tlumivek. Parametr je nastaven tzv. dobou blokování znovuzapnutí v regulátoru.

5.7.8 Regulátor jalového výkonu

Zásadním požadavkem na regulátor je schopnost měřit proudy ve všech třech fázích a vyhodnocovat trojfázový účinník, abychom se vyhnuli nepřesné regulaci v důsledku nesymetrického zatížení fází. Podmínce vyhovuje regulátor Novar 1406. Regulátor je opatřen jedním napěťovým vstupem, což je s ohledem na symetrii napájecího napětí postačující.

Aby byla zajištěna kompenzace rozvodny R2 pro libovolnou koncepci napájení, je nutné snímat proudy ze dvou míst (na přípojnicích mezi kobkami č. 4–5 a č. 29-30) a tyto pak sečíst součtovým transformátorem. K měření proudů mohou být využity stávající měřicí transformátory proudů.

Ohledně nastavení regulátoru doporučuji parametr doby regulace v oblasti nedokompenzování a překompenzování nastavit na 1 minutu. Tzn., že při regulační odchylce větší, než 1/2 nejmenšího regulačního stupně provede regulátor vyhodnocení a akční zásah každou jednu minutu.

Pro zabránění možného přetížení harmonickými je potřeba nastavit hodnotu $THDu$. Na základě kapitoly 5.5 je spočítáno, že přetížení 1,3 (zahrnující rovněž toleranci kapacity a napětí) nastane při $THDu = 5,8 \%$.

5.7.9 Ostatní ochranná opatření

Zvýšený stupeň jistění budou zajišťovat přetlakové pojistky kondenzátorových baterií, jejichž působení bude snímáno prostřednictvím tlakového čidla. Teplotní čidlo tlumivky zapojené do série s ovládací cívkou stykače rovněž zajistí odpojení celého kompenzačního stupně při překročení mezní hodnoty oteplení.

Požadováno je i hlídání teploty celého rozvaděče na maximální střední hodnotě nepřesahující 35°C za 24 hodin. Dále pak systém stavu pojistek a pro ochranu osob před úrazem elektrickým proudem i systémem hlídání otevření dveří rozvaděče.

6 Technicko - ekonomické zhodnocení

Výhradním distributorem elektrické energie pro napájení rozvodny R2 je Energetika Třinec, a.s. Za současného provozu, kdy je k síti trvale připojena kompenzace K1 (7,9 Mvar), nebo K4 (8,28 Mvar), nejsou dohodnuty žádné sankce za nedodržení účinník.

Na základě provedeného měření je zřejmé, že postačující je podstatně nižší kompenzační výkon. V důsledku toho je kromě provozu válcovny, kompenzována i část sítě Energetiky Třinec. Distributor tak šetří náklady spojené s buzením synchronních generátorů a provozem dalších kompenzačních prostředků na úkor odběratele. Ztráty v stávajících kompenzacích K1, nebo K4 jsou totiž zahrnuty do odběru celkové činné energie rozvodny R2. U kompenzací s filtračními tlumivkami se ztráty pohybují okolo 0,5 % kompenzačního výkonu. Výkonu 8 Mvar, tedy odpovídá ztrátový výkon 40 kW.

Průměrný odebíraný činný výkon v měřeném období činí 0,85 MW při účinníku $\cos\varphi = 0,5$. Tzn., že požadovanému účinníku $\cos\varphi = 0,95$ odpovídá průměrný jalový výkon kompenzačního zařízení 1,2 Mvar. U kompenzací s hradíci tlumivkami se ztráty pohybují dle činitele ztlumení v rozsahu $5,5 \div 7 \text{ W / kvar}$. Uvažují průměrné činné ztráty na úrovni 0,6 % jalového výkonu, tedy 7,2 kW.

Při ceně elektrické energie 1,82 Kč / kWh jsou roční úspory vzhledem k provozu stávajícího kompenzačního zařízení cca 520 000,- Kč.

Pro stanovení investiční ceny kompenzačního rozvaděče, který vyhovuje zpracování diplomové práce, včetně přívodního kabelu, hlavního vypínače, vybíjecích zařízení, regulace a signalizace provozu (teplota rozvaděče a tlumivek, tlak v kondenzátorech, stav pojistek, hlídání otevření dveří), bylo osloveno několik dodavatelů – ZEZ SILKO, KOMPTEL, ZÁVODNÝ ELEKTRO. Náklady se pohybují v rozmezí 2 až 2,2 mil. korun.

Důležité je rovněž zohlednit náklady na údržbu kompenzace. Jedná se především o seřizování vakuových stykačů. Zkušenost ukazuje, že první oprava u stykačů nastává cca po 250 tis. sepnutí, přičemž náklady na opravu dosahují 10 tis. Kč / kus. V případě výměny vakuového zhášedla jsou náklady ještě vyšší - jedná se však o výjimečný stav. Předpokládaná životnost kompenzačních kondenzátorů udávaná výrobcem je až 130 tis. hodin provozu.

S ohledem na uvedené okolnosti je doba návratnosti vynaložené investice do 4,5 let. Náklady na provoz jsou zohledněny v podobě vyšších ročních úspor, vlivem růstu ceny odebírané energie (trend růstu ceny el. energie uvažují na úrovni 4,2 %).

Alternativou navrhnutého řešení by mohlo být bezkontaktně spínané kompenzační zařízení. Došlo by však k 100 % navýšení investičních nákladů s úměrným prodloužením návratnosti investice. Opět je nutno připomenout základní kritérium kompenzace, tedy aby získané úspory byly větší, než náklady vynaložené na její vybudování.

Na základě konzultace s dodavateli kompenzačních zařízení doporučuji svěřit vybudování řízené kompenzace společností Kompel, s.r.o., Brno, která má v dané problematice dlouholeté zkušenosti. Oceňuji především profesionální přístup, využívání kvalitních komponent a ochotu spolupracovat.

Závěr

Úkolem této diplomové práce bylo navrhnout řízenou kompenzaci pro rozvodnu 6 kV, napájející provoz válcovny předvalků a hrubých profilů v Třineckých železárnách. Pro stanovení požadavků na parametry kompenzačního zařízení byly během jednoho týdne, za běžného provozu, zaznamenávány informace o kompenzované síti. Data byla analyzována, srovnána s kompatibilními úrovněmi průmyslových závodů dle ČSN 61000-2-4 a na základě nabytých poznatků, při seznamování se s danou problematikou, aplikována na výběr vhodné kompenzace.

S ohledem na informace o provozu a finanční možnosti investora je návrh zaměřen na kontaktní stupňovitě spínané kompenzační zařízení. Díky nízkému harmonickému zkreslení ($THDu < 2 \%$) není nutné koncipovat kompenzaci jako filtr. Postačující je přeladění do kmotočtového pásma, kde se nevyskytují harmonické se zachováním dostatečného odstupu od frekvence HDO signálu. Využito je předřazených hradících tlumivek, které zároveň omezují spínací rázy.

Prvotní rozhodnutí o velikosti kompenzačních stupňů vyžadovalo hlubší zamyšlení se nad danou problematikou. Návrh totiž nevychází ze systematického postupu, ale z praktických zkušeností. Jelikož se u kompenzací vn využívá váhového rozdělení kompenzačního výkonu, rozhoduje o hodnotě vykompenzování velikost nejmenšího stupně, která je však nepřímo úměrná celkovému počtu kompenzačních sekcí a tedy i celkovým investičním nákladům. Proto byl zvolen určitý kompromis. Při návrhu je potřeba zohlednit i vliv činného výkonu na požadovaný účinník.

Pro rozhodnutí, které by nebylo diskutabilní, jsem vytvořil grafické závislosti zahrnující výše uvedené úvahy. S ohledem na dynamický provoz není stanovena přesná hodnota účinníku (obvykle 0,95). Za vyhovující je uvažováno rozmezí $0,93 \div 0,97$. Výsledek řešení ukazuje, že kompenzace je schopna pokrýt 77 % odběrů s účinníkem větším než 0,93. 18 % odběrů může vykazovat horší účinník – nejhůře však 0,85. Zcela bez kompenzace bude 5 % odběrů se zatížením menším než 0,110 MW.

V dalším postupu bylo potřeba zkontrolovat možné přetížení kondenzátorových baterií, dimenzovat přívodní vedení, spínací a jistící prvky. K tomu jsem využil znalosti programového prostředí EMTP – ATP. Modelové schéma umožnilo přehledně analyzovat přechodné jevy při spínání a následně zvolit vyhovující přístroje.

Pro posouzení finanční náročnosti kompenzace jsem na základě analýzy trhu provedl výběr jednotlivých komponent a oslovil dodavatele kompenzačních zařízení s žádostí o vyčíslení investičních nákladů navrhnutého řešení. Ekonomické hledisko je zaměřeno na úsporu elektrických ztrát při nahrazení současného způsobu kompenzace jalového výkonu. Za stávajících podmínek odebírané energie je návratnost vynaložené investice do 4,5 let.

Správně dimenzovaný kompenzační rozvaděč by měl samostatně vykonávat svou činnost po dobu několika let, bez toho, aby mu uživatel věnoval pozornost. V praxi je však poměrně málo takových realizací. Zvláště v náročných průmyslových provozech je důležité sledovat a provádět seřizování kompenzace na základě aktuálních podmínek provozu, tak aby bylo dosaženo správné funkce a dlouhé životnosti zařízení.

Literatura

- [1] NOVOTNÝ, Vladimír; VÁVRA, Zdeněk. *Spínací přístroje a rozvaděče na vysoké napětí*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1986. 270 s.
- [2] PAUZA, Josef. *Silnoproudá rozvodná zařízení v průmyslu*. 1.vydání. Praha: SNTL, 1974. 342 s.
- [3] SANTARIUS, Pavel. *Elektrické stanice a vedení*. 1. vydání. Ostrava: VŠB-TU, 1990. 214 s. ISBN 80-7078-032-0.
- [4] FENCL, František. *Elektrický rozvod a rozvodná zařízení*. 1. vydání. Praha: ČVUT, 2003. 195 s. ISBN 80-01-02771-6.
- [5] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí*. 1. vydání. Ostrava: VŠB-TU, 2008. 210 s. ISBN 978-80-248-1696-8.
- [6] KORENC, Vladimír; HOLOUBEK Jiří. *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. 1. vydání. Praha: IN-EL, 1999. 127 s. ISBN 80-86230-07-4.
- [7] HORÁK, Karel. *Výpočet elektrických sítí*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1980. 307 s.
- [8] KREJČÍ, Petr. *Cvičení z elektroenergetiky*. Ostrava: VŠB-TU, 2003. 107 s. Skriptum.
- [9] Katalog kabelů. *nkt cables*.
URL: < <http://www.nktcables.com> > [cit. 2012-3-16].
- [10] SAMIEC, Miroslav. *Analýza sítě vysokého napětí, nízkého napětí válcovny předvalků a hrubých profilů*. Ostrava: VŠB-TU, 2008. 60 s. Diplomová práce.
- [11] Firemní literatura Energetiky Třinec, a.s.
- [12] Firemní literatura Třineckých železáren, a.s.
- [13] ČSN EN 61000-2-4. *Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením v průmyslových závodech*.
- [14] Návod k obsluze. *Analýzátor kvality elektrické energie typ C.A 8334*
URL: < <http://www.ghvtrading.cz> > [cit. 2012-3-16].
- [15] Návod k obsluze. *Regulátory jalového výkonu Novar*.
URL: < <http://www.kbh.cz> > [cit. 2012-3-16].
- [16] PROCHÁZKA, R. *Druhy elektrického silnoproudého rozvodu*.
URL: < <http://www.tzb-info.cz> > [cit. 2012-3-16].
- [17] MOLNÁR, Miloš. *Zlepšení účinnosti v energetice a návrh vhodných kompenzačních prostředků*.
URL: < <http://www.volny.cz/molnarm/pdf/kompenzace.pdf> > [cit. 2012-3-16].
- [18] ŠPÉRA, Zdeněk; *Influence of balancing filter switched step by step 0.4 kV with tuned sequence on duality of supply* URL: <http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2003/fsbornik/99-CD/02-Mgr/04-Power_Electrical_Engineering/07-spera_zdenek.pdf> [cit. 2012-3-16].

Seznam obrázků

Obr. 1.1-1 Transformovna vn/vn	3
Obr. 1.1-2 Jednoduchý systém přípojníc.....	5
Obr. 1.1-3 Jednoduchý systém přípojníc s pp	5
Obr. 1.1-4 Dvojitý systém přípojníc s pomocnou přípojnicí.....	6
Obr. 1.1-5 Systém s 1,5 vypínačem na odbočku	6
Obr. 1.1-6 Systém se 2 vypínači na odbočku	6
Obr. 1.1-7 Okružní přípojnice.....	7
Obr. 1.1-8 Rozvodná zařízení typu "H"	7
Obr. 1.1-9 Schéma odboček vn.....	8
Obr. 1.2-1 Paprskový rozvod.....	9
Obr. 1.2-2 Průběžný rozvod	9
Obr. 1.2-3 Okružní rozvod	10
Obr. 1.2-4 Mřížový rozvod	10
Obr. 1.6-1 Připojení paralelního aktivního filtru k síti	15
Obr. 1.6-2 Individuální kompenzace účinníku.....	16
Obr. 1.6-3 Skupinová kompenzace účinníku.....	17
Obr. 1.6-4 Centrální kompenzace účinníku	17
Obr. 3.3-1 Kmitočtové charakteristiky L , C a LC	23
Obr. 3.4-1 Stupňovitě spínaná kompenzace	25
Obr. 3.4-2 Jeden stupeň tyristorově spínaného kompenzačního zařízení.....	26
Obr. 3.4-3 Plynule řízený kompenzátor s dekompenzačním členem	27
Obr. 4.4-1 Časový průběh efektivních hodnot napětí U_N	33
Obr. 4.4-2 Časový průběh jalového výkonu.....	34
Obr. 4.4-3 Časový průběh činného výkonu	35
Obr. 4.4-4 Časové průběhy výkonů pro bližší posouzení.....	35
Obr. 4.4-5 Časový průběh výkonů v úseku největších změn zatížení	36
Obr. 4.4-6 Časový průběh výkonů v úseku s minimálním odběrem	36
Obr. 4.4-7 Harmonická napětí v síti	37
Obr. 4.4-8 Průběh účinníku $\cos\varphi$	38
Obr. 5.2-1 Šířka regulačního pásma	41
Obr. 5.2-2 Šířka regulačního pásma $\Delta Q = 220$ kvar	42
Obr. 5.2-3 Šířka regulačního pásma po úpravě regulátorem ($\Delta Q = 220$ kvar).....	43
Obr. 5.2-4 Připínání kompenzačních stupňů k zajištění požadovaného $\cos\varphi$	44
Obr. 5.2-5 Kompenzační kondenzátory vn.....	44
Obr. 5.3-1 Kompenzační sekce	45
Obr. 5.3-2 Pokrytí odběrů po předřazení tlumivek.....	47
Obr. 5.5-1 Rezonanční křivka prvního stupně kompenzace	48
Obr. 5.6-1 Jednofázové schéma čtyř-stupňové kompenzace v EMTP-ATP	51
Obr. 5.6-2 Připnutí 1. stupně v max. napětí (IC_1) a při průchodu napětí nulou (IC_1').....	51
Obr. 5.6-3 Připnutí 1. stupně v max. napětí, při částečně vybitém kondenzátoru.....	52
Obr. 5.6-4 Zotavené napětí na kontaktech stykačů	53
Obr. 5.7-1 Kompenzační rozvaděč vn.....	54

Seznam tabulek

Tab. 4.2-1	Kompatibilní úrovně pro odchylky napětí, kmitočtu sítě a nesymetrie napětí	30
Tab. 4.2-2	Kompatibilní úrovně pro harmonické složky napětí U_h	30
Tab. 4.2-3	Kompatibilní úrovně pro celkové harmonické zkreslení	30
Tab. 4.4-1	Údaje o odběru jalového výkonu Q v měřeném období	34
Tab. 4.4-2	Úrovně $THDu$ a $THDi$	38
Tab. 5.2-1	Údaje o odběru činného výkonu P v měřeném období.....	42
Tab. 5.3-1	Základní údaje spínaných kompenzačních sekcí.....	46
Tab. 5.5-1	Nárůst efektivní a špičkové hodnoty proudu vzhledem k $THDi$	49
Tab. 5.6-1	Max. a ustálené hodnoty (amplitudy) při spínání kompenzačních stupňů, odečtené v EMTP ..	52
Tab. 5.7-1	Technické údaje rozvaděče.....	54
Tab. 5.7-2	Pojistkové tavné vložky CEF (ABB) vn dle mezinárodního standardu IEC 60 282-1.....	56
Tab. 5.7-3	Jmenovité parametry kompenzačních kondenzátorů	57
Tab. 5.7-4	Výchozí údaje pro hradící tlumivky	57

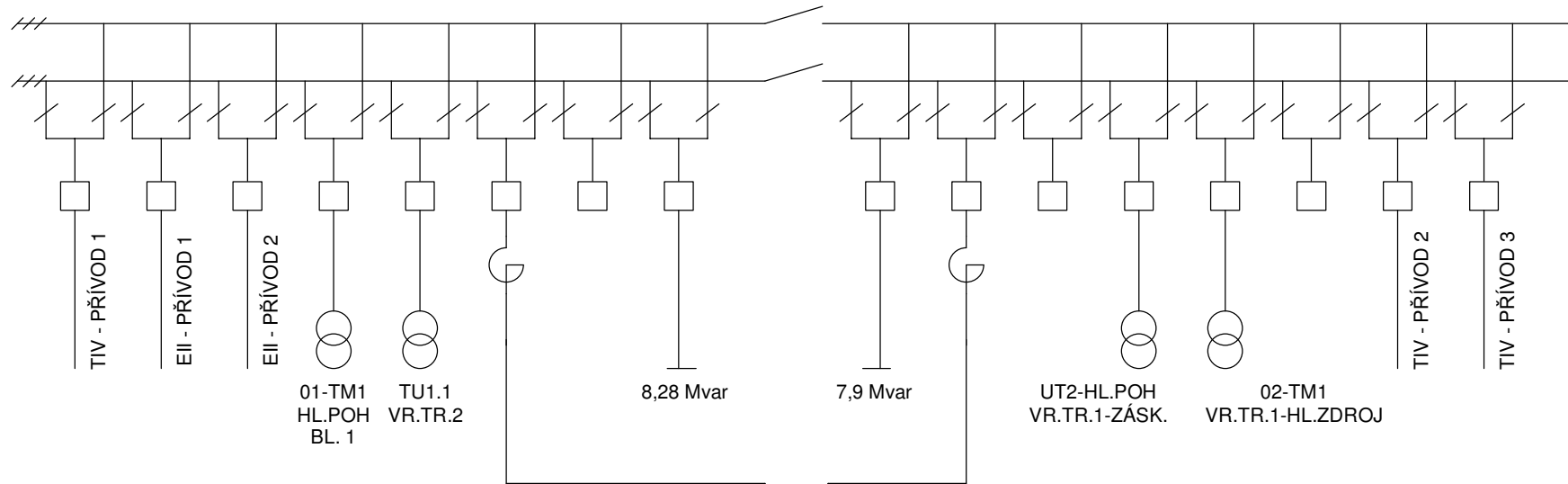
Seznam příloh

- Příloha č. 1 Přehledové schéma rozvodu 6 kV
- Příloha č. 2 Přehledové schéma kompenzačního rozvaděče

PŘEHLEDOVÉ SCHÉMA ROZVODU 6 kV

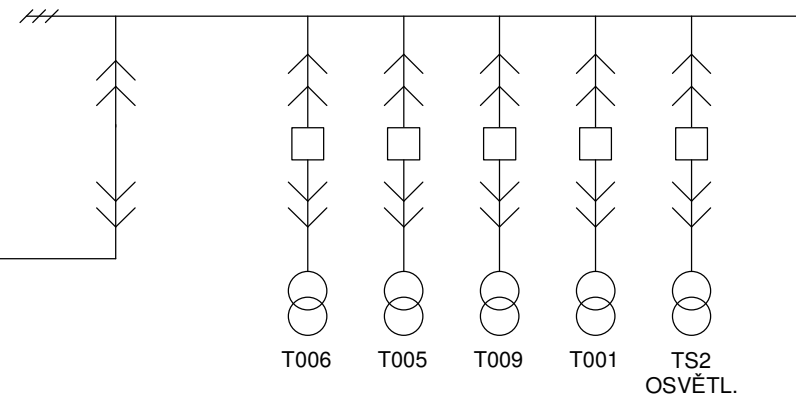
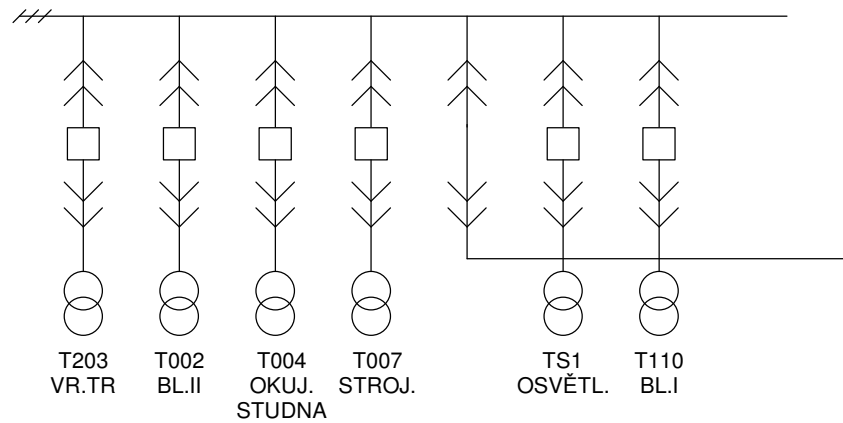
R2

HLAVNÍ KOBKOVÁ ROZVODNA



R3.1 PODRUŽNÁ SKŘÍŇOVÁ ROZVODNA

R3.2 PODRUŽNÁ SKŘÍŇOVÁ ROZVODNA



PŘEHLEDOVÉ SCHÉMA KOMPENZAČNÍHO ROZVADĚČE

